



IMPACTO DEL BLANQUEAMIENTO EN LA SALUD DE LOS ARRECIFES DE CORAL EN EL CARIBE SUR DE COSTA RICA



**DOBLE GRADO CIENCIAS DEL MAR Y CIENCIAS
AMBIENTALES**

TRABAJO FIN DE GRADO

Curso 2020-2021

Puerto Real, Cádiz. 15-06-2021

Autor: Diego Fansa Fernández

Tutores: J. Adolfo Chica Ruiz (UCA) y J. José Alvarado Barrientos (UCR)

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todos los integrantes del Centro de Buceo Comunitario Embajadores y Embajadoras del Mar por formar parte de este proyecto, por su ilusión y buena voluntad.

A mis tutores por la ayuda y los consejos, pero también por darme la libertad y confianza para hacer el trabajo que buscaba.

A todos los amigos, colegas y compañeros que, en algún momento entre el principio y el final, formaron parte de este viaje.

Y, por último, agradecer especialmente a mi familia por todo el cariño y apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado a pesar de encontrarse lejos.

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

RESUMEN

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Importancia y servicios de los arrecifes coralinos.....	4
1.2. Principales impactos y amenazas sobre los arrecifes coralinos.....	6
1.3. Antecedentes en el Caribe costarricense	8
1.4. Participación ciudadana.....	11
2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	11
3. ÁREA DE ESTUDIO	13
3.1. Región biogeográfica	13
3.2. Puntos de muestreo.....	14
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
4.1. PRONAMEC.....	16
4.2. <i>Coral Health Chart</i>	18
4.3. <i>Coral Reef Watch</i>	20
4.4. Participación ciudadana.....	21
5. RESULTADOS.....	22
5.1. PRONAMEC y <i>Coral Health Chart</i>	23
5.1.1. Puerto Viejo (Chino Beach)	23
5.1.2. Punta Cocles (Caracola)	24
5.1.3. Punta Uva (Selvin)	25
5.1.4. Punta Uva (Arrecife)	27
5.2. Blanqueamiento coralino (<i>Coral Reef Watch</i>)	27
5.3. Participación ciudadana	31
6. DISCUSIÓN.....	33
7. RECOMENDACIONES.....	43
8. CONCLUSIONES.....	47
9. BIBLIOGRAFÍA.....	50
10. ANEXOS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de regiones utilizadas para clasificar los índices de El Niño. Fuente: Trenberth, 2021.....	8
Figura 2. 1ª imagen: costa del Caribe de Costa Rica y Áreas Protegidas (rectángulo rojo: área de estudio). Fuente: Cortés, 2016. 2ª imagen: puntos de muestreo (Globos rojos: A-D) del estudio en el Caribe sur de Costa Rica. Fuente: Google Earth.	10
Figura 3. Regiones biogeográficas de los arrecifes de coral. En rojo (4), la subprovincia del Caribe. Fuente: Stehli & Wells (1971).	13
Figura 4. Miembros del Centro Comunitario midiendo cobertura de sustrato mediante la técnica punto intercepto.....	16
Figura 5. Cinta métrica depositada en el fondo marino para llevar a cabo la medición de cobertura de sustrato.	17
Figura 6. De izquierda a derecha: Porites astreoides vivo, Millepora complanata blanqueado, Siderastrea siderea enfermo, Pseudodiploria strigosa muerto.	17
Figura 7. Transecto punto intercepto con SCUBA (4 m de profundidad).	18
Figura 8. Coral Health Chart. Hue: tonalidad; Saturation: saturación; Brightness: brillo. Fuente: Siebeck et al., 2006.	19
Figura 9. Tipos morfológicos utilizados mediante la metodología Coral Health Chart. Boulder: masivo; Plate: plato; Branching: ramificado; soft: blando. Fuente: Siebeck et al., 2006.	19
Figura 10. Porcentaje de la cobertura promedio ($\pm 8,3$) de sustrato en el arrecife de Puerto Viejo (Chino Beach) en octubre 2020.....	23
Figura 11. Distribución morfológica y distribución de escalas de color de los corales muestreados en el arrecife de Puerto Viejo (Chino Beach) en octubre 2020.	24
Figura 12. Porcentaje de la cobertura promedio ($\pm 12,2$) de sustrato en el arrecife de Punta Cocles (Caracola) en octubre de 2020.....	24
Figura 13. Distribución morfológica y de escalas de color de los corales muestreados en el arrecife de Punta Cocles (Caracola) en octubre 2020.	25
Figura 14. Porcentaje de la cobertura promedio ($\pm 11,4$) de sustrato en el arrecife de Punta Uva (Selvin) en octubre 2020.	26
Figura 15. Distribución morfológica y de escalas de color de los corales muestreados en el arrecife de Punta Uva (Selvin) en octubre 2020.....	26
Figura 16. Porcentaje de la cobertura promedio ($\pm 8,9$) de sustrato en el arrecife de Punta Uva (Arrecife) en octubre 2020.	27
Figura 17. Anomalías térmicas anuales a nivel mundial en el periodo 1900-2020. Fuente: NOAA, 2021.	28
Figura 18. Anomalías térmicas anuales para la zona de estudio (9.4 N – 82.0 W) durante el periodo 1900-2020. Fuente: NOAA, 2021.	28
Figura 19. ONI (Oceanic Niño Index) para los últimos 70 años, con base en el periodo 1960-1989. En rojo y azul, fenómenos considerados más importantes. Fuente: Trenberth, 2021.	29
Figura 20. Anomalías térmicas anuales para la zona de estudio durante la década 2010-2020 (9.4 N - 82.0 W). Fuente: (NOAA, 2021).	29
Figura 21. Alertas de blanqueamiento periodo 2010-2020. Fuente: NOAA Coral Reef Watch, 2019.	30
Figura 22. Impresiones de los miembros del Centro Comunitario sobre el estado de salud de los arrecifes coralinos de la zona, antes (1ª imagen) y después (2ª imagen) de realizar los muestreos.	31
Figura 23. Impresiones de los miembros del Centro Comunitario, al respecto de su conocimiento sobre la ecología y biodiversidad de los arrecifes, antes (1ª imagen) y después (2ª imagen) de realizar los muestreos.....	31
Figura 24. Impresiones de los miembros del Centro Comunitario, relativas a su conocimiento de las técnicas y procedimientos para el monitoreo de arrecifes coralinos, antes (1ª imagen) y después (2ª imagen) de realizar los muestreos.....	32
Figura 25. Grado de satisfacción de los miembros del Centro Comunitario, relativas al uso y utilidad de las metodologías PRONAMEC (1ª imagen) y CHC (2ª imagen).	32

Figura 26. Grado de satisfacción de los miembros del Centro Comunitario, relativas a las charlas informativas recibidas (1ª imagen), y nivel de mejora de sus aptitudes y habilidades (2ª imagen).	33
Figura 27. Comparación porcentual de cobertura del sustrato en los 4 puntos de muestreo en el Caribe Sur de Costa Rica para octubre 2020. Azul: Puerto Viejo; naranja: Punta Cocles; verde: Punta Uva (Selvin); amarillo: Punta Uva (Arrecife).	33
Figura 28. Colonia de <i>Pseudodiploria clivosa</i> en el Caribe Sur de Costa Rica.	37
Figura 29. Comparativa del estado de salud del coral en los 4 puntos de muestreo.	38
Figura 30. Anomalías térmicas mensuales para la zona de estudio (9.4 N – 82.0 W) durante el año 1983. Fuente: (NOAA, 2021).	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los principales servicios de los arrecifes coralinos.	4
Tabla 2. Niveles de estrés por blanqueamiento coralino del CRW. Fuente: (NOAA Coral Reef Watch 5km Methodology Page, 2021).	21
Tabla 3. Valores numéricos porcentuales de los indicadores “Cobertura de coral” y “Cobertura de macroalgas carnosas” asociados a índices de salud. Fuente: McField et al., 2020.	35
Tabla 4. Comparación porcentual de cobertura de coral vivo y macroalgas carnosas entre los lugares de muestreo y los países del Arrecife Mesoamericano.	35
Tabla 5. Media ponderada de las respuestas recibidas por los miembros del Centro Comunitario a la encuesta realizada después de realizar los muestreos. Escala 1-5.	42
Tabla 6. Conjunto de metas y acciones recomendadas, con el objetivo de crear voluntad de cambio (Acción estratégica 1).	44
Tabla 7. Conjunto de metas y acciones recomendadas, con el objetivo de crear capacidad para el cambio (Acción estratégica 2).	44
Tabla 8. Conjunto de metas y acciones recomendadas, con el objetivo de mejorar el manejo (Acción estratégica 3).	45
Tabla 9. Conjunto de metas y acciones recomendadas, con el objetivo de promover la acción internacional (Acción estratégica 4).	46
Tabla 10. Acciones recomendadas para la mitigación o reducción de los principales impactos antropogénicos en la zona de estudio.	46

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACC	Algas Coralinas Costrosas
ACLAC	Área de Conservación La Amistad-Caribe
AMP	Área Marina Protegida
CHC	Coral Health Chart
CIMAR	Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología
CRW	Cuadro de salud de coral (Coral Reef Watch)
DHW	Degree Heating Week
ENOS	El Niño Oscilación Sur
HS	Punto caliente (Hot Spot)
INCOPECA	Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
NOAA	Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (National Oceanic and Atmospheric Administration)
ONI	Índice Oceánico el Niño (Oceanic Niño Index)
PRONAMEC	Programa Nacional de Monitoreo Ecológico
REGAMA	Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
SST	Temperatura superficial del mar (Sea Surface Temperature)
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wildlife Foundation)

RESUMEN

Los arrecifes de coral son uno de los ecosistemas más productivos y biológicamente diversos del planeta. Proporcionan numerosos beneficios y servicios a las comunidades costeras y son fuente de ingresos y comida de millones de personas. En los últimos 50 años se ha observado un declive en la condición de estos ecosistemas, como consecuencia de actividades antropogénicas principalmente. Además, los efectos del cambio climático están provocando que la temperatura de los océanos aumente, lo que produce una mayor frecuencia de fenómenos de blanqueamiento y mortandad coralina. El Caribe Sur de Costa Rica posee varias estructuras coralinas de interés que están expuestas a estos impactos. El objetivo de este trabajo consistió en un monitoreo para cuantificar la condición de algunos de estos arrecifes, enfocándose especialmente en la cobertura de sustrato a través de la técnica de transectos con Punto Intercepto. Asimismo, se evaluó el impacto del evento de blanqueamiento de octubre 2020 mediante la metodología *Coral Health Chart*. Se utilizó el programa *Coral Reef Watch* de la NOAA para elaborar una revisión histórica del estrés térmico y de los fenómenos de blanqueamiento que había sufrido esta zona. Durante este proceso se contó con la ayuda del Centro de Buceo Comunitario Embajadores y Embajadoras del Mar, organización local que trabaja por la conservación y protección de los arrecifes y áreas costeras. Los resultados obtenidos mostraron unos arrecifes dominados por macroalgas y una cobertura de coral variable. Punta Cocles ofreció la cobertura de coral más baja ($5,5 \pm 12,2$ %) mientras que en Punta Uva se encontraron las más altas ($22,0 \pm 11,9$ % y $26,3 \pm 8,4$ %). El blanqueamiento coralino únicamente registró cotas importantes en Punta Cocles (36,2% del total de coral medido) pero todos los puntos de muestreo exhibieron recuperaciones considerables de este fenómeno. Respecto al análisis histórico del estrés térmico se determinó que el periodo que entraña un mayor riesgo son los meses de septiembre y octubre. Se espera que cada vez sean más frecuentes estos eventos, por lo que será necesario aplicar nuevas y mejores medidas de gestión para minimizar en todo lo posible los impactos antropogénicos sobre los arrecifes de coral. En este trabajo se expusieron una serie de recomendaciones enmarcadas dentro de ciertas líneas estratégicas y metas a cumplir, que pretenden servir de ejemplo para los tomadores de decisiones.

Palabras clave: arrecifes, cobertura, estrés térmico, blanqueamiento, participación ciudadana.

ABSTRACT

Coral reefs are one of the most productive and biologically diverse ecosystems of the planet. They provide many benefits and services to coastal communities and are source of income and food for millions of people. The last 50 years have seen a decline in the condition of these ecosystems, mainly as a consequence of anthropogenic activities. In addition, climate change effects are causing oceans temperature to rise, resulting in more frequent coral bleaching and coral mortality. The Southern Caribbean of Costa Rica has several coral structures of interest that are exposed to these impacts. The objective of this work consisted of monitoring to quantify the condition of some of these reefs, focusing especially on substrate cover using the Point Intercept transect technique. The impact of the October 2020 bleaching event was also assessed using the Coral Health Chart methodology. NOAA Coral Reef Watch programme was used to develop a historical review of thermal stress and bleaching events that had occurred in this area. The Centro de Buceo Comunitario Embajadores y Embajadoras del Mar, a local organisation that works for the conservation and protection of reefs and coastal areas, assisted in this process. The results showed reefs dominated by macroalgae and variable coral cover. Punta Cocles had the lowest coral cover (5.5 ± 12.2 %) while Punta Uva had the highest (22.0 ± 11.9 % and 26.3 ± 8.4 %). Coral bleaching only recorded significant levels at Punta Cocles (36.2% of the total coral measured) but all sampling points exhibited considerable recoveries of this phenomenon. The historical analysis of thermal stress showed that the period with the highest risk is September and October. These events are expected to become more frequent, so new and better management measures will be needed to minimise anthropogenic impacts on coral reefs as much as possible. In this work, a series of recommendations were presented, framed within certain strategic lines and goals to be met, which are intended to serve as an example for decision-makers.

Keywords: reefs, cover, thermal stress, bleaching, citizen participation.

1. INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son un importante componente de la biosfera, dominando hábitats costeros en áreas tropicales y subtropicales (Knowlton *et al.*, 2010). Están constituidos por grandes acreciones de carbonato cálcico (CaCO_3), que forman estructuras bentónicas tridimensionales de gran complejidad, las cuales son construidas por diversos organismos que tienen la capacidad de formar su exoesqueleto, y, en conjunto, al arrecife (Paz-Pellat *et al.*, 2019). Se encuentran entre los ecosistemas más productivos y biológicamente diversos del planeta (Odum & Odum, 1955; Connell, 1978; Moberg & Folke, 1999). El total de especies descritas que albergan constituye el 5% de la biota global del planeta, a pesar de que tan solo abarcan el 0,1% de la superficie de este (Reaka-Kudla, 1997).

Conforman las estructuras biogénicas más grandes de la Tierra, siendo la Gran Barrera de Coral de Australia la estructura viva más fácilmente distinguible desde el espacio. Los corales son animales pequeños (llamados pólipos) que viven en colonias y forman estos arrecifes. Obtienen su alimento de dos maneras: primero, usando sus tentáculos para atrapar plancton y, segundo, por medio de microalgas (llamadas zooxantelas) que viven en el tejido del coral (Westmacott *et al.*, 2000).

Sin embargo, también podrían considerarse como el ecosistema más amenazado globalmente (Mumby & Steneck, 2008). Actualmente, estas amenazas proceden, a nivel local, de artes pesqueras destructivas, sobrepesca, desarrollo costero no planificado y contaminación del agua procedente de cuencas terrestres (Burke *et al.*, 2011). Sumado a factores relacionados con el cambio climático global, como son la subida del nivel del mar, el calentamiento del agua y la acidificación oceánica (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2008). El conjunto de estas fuentes locales, sumada al estrés térmico, afectan al 75% de los arrecifes en todo el mundo (Burke *et al.*, 2011). Aunque existen todavía algunas comunidades arrecifales locales que muestran una recuperación considerable, numerosos estudios indican que el promedio de cobertura de coral vivo está decreciendo a nivel circumtropical; esto sucede porque los disturbios tienen un nivel de ocurrencia similar al proceso de recuperación de los mismos, por lo que los corales dañados que se encuentran sometidos a niveles de estrés importantes tienden a producir menos larvas (Birkeland, 2019).

Existen varios tipos de arrecife según su proceso de formación. El crecimiento de un arrecife y su estructura dependen de las características geológicas del lecho marino, la temperatura del agua, la química del mar y el impacto de las olas (Byatt *et al.*, 2001).

1.1. Importancia y servicios de los arrecifes coralinos

Los servicios ecosistémicos son las características, funciones o procesos ecológicos que directa o indirectamente contribuyen al bienestar humano (MEA, 2005). Más de 100 países poseen línea de costa con arrecifes de coral. Se debe considerar que los arrecifes son uno de los sistemas más complejos de todos los ecosistemas marinos (Moberg & Folke, 1999) por lo que el entendimiento de sus interacciones dinámicas no está completado en ningún caso (Hughes *et al.*, 1992). Para asegurar la capacidad de los arrecifes de proveer a la humanidad con bienes y servicios ecológicos, la resiliencia de estos debe ser conservada (Moberg & Folke, 1999).

Haciendo uso de la clasificación de los servicios ecosistémicos litorales de Andalucía (Chica & Barragán, 2011), se pueden nombrar los siguientes subtipos de bienes y servicios para los arrecifes coralinos (Moberg & Folke, 1999; Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de los principales servicios de los arrecifes coralinos

	Tipo/Subtipo	Categorías	Definición	Ejemplos relacionados
SERVICIOS DE ABASTECIMIENTO	Alimentación	Materiales bióticos	Organismos de origen animal que sirven como sustento para las comunidades	Peces (mero), crustáceos (langosta del Caribe), moluscos (pulpo común) (Craig <i>et al.</i> , 1990)
	Materias primas para medicinas	Materiales bióticos	Compuestos procedentes de animales y algas que son utilizados en la industria farmacéutica y médica	Prostaglandinas de la gorgona (<i>Plexaura homomalla</i>) para tratar desde jaqueca hasta cáncer (Carté, 1996)
	Materias primas para agar y fertilizante	Materiales bióticos	Compuestos vegetales destinados a la industria alimentaria y agroquímica	Pastos marinos, algas (Birkeland, 1997a)
	Souvenirs y joyería	Materiales bióticos	Materias extraídas por sus propiedades estéticas que poseen alto valor comercial	Coral rojo (<i>Corallium rubrum</i>) (Goh & Chou, 1994)
	Comercio de especies de acuario	Materiales bióticos	Organismos extraídos vivos para su venta y/o exposición como especies de acuario	Falso gramma (<i>Pictichromis paccagnellae</i>) y coral escleractinio (<i>Euphyllia glabrescens</i>) (Wood, 1985)
	Recursos energéticos	Energía	Combustibles fósiles para el sector energético	Petróleo y gas (Hodgson, 1997)

SERVICIOS DE REGULACIÓN	Protección de la línea de costa	Amortiguación de perturbaciones	Estructura biogénica defensiva frente a tormentas, huracanes y ciclones	Reducir impactos de tormentas, erosión e inundaciones en comunidades costeras (Cesar, 1996)
	Refuerzo físico de la costa y generación de islas	Amortiguación de perturbaciones	Mitigación del riesgo y reducción de los costes estructurales de defensa	Reducción de olas y marejadas (Stoddart, 1973)
	Soporte de ecosistemas	Regulación morfo-sedimentaria	Generación de condiciones favorables para el crecimiento de manglares y pastos marinos	Soporte para el crecimiento de manglares y pastos marinos (Ogden, 1988)
	Mantenimiento de los hábitats, biodiversidad y banco genético	Control biológico	Áreas de desove, cría y alimentación de múltiples organismos	25% de todas las especies marinas viven en algún momento en los arrecifes (Birkeland, 1997a)
	Regulación de las funciones y procesos ecosistémicos y refuerzo de la resiliencia	Regulación ecosistémica	Procesos clave que tienen lugar para el correcto equilibrio y mantenimiento de los arrecifes	Procesos clave (pastoreo, depredación) (Hughes, 1994)
	Fortalecimiento de las conexiones dinámicas	Control biológico	Transferencia de energía entre diferentes ecosistemas e interrelación de funciones	Erizos de mar y peces herbívoros se trasladan desde los arrecifes a pastos marinos para pastorear, y allí sirven también de alimento para depredadores o pescadores (Parrish, 1989)
	Exportación de la producción orgánica y del plancton a las redes tróficas pelágicas	Control biológico	Apoyo a las redes pelágicas mediante la exportación del exceso de materia orgánica, lo cual mejora la productividad de las comunidades planctónicas locales y apoya las pesquerías	Mucus, ésteres de cera, materia orgánica disuelta, bacterioplancton, fitoplancton y zooplancton (Sorokin, 1990)
	Fijación de nitrógeno	Biogeoquímico	Asimilación de nitrógeno atmosférico	Asociaciones de cianobacterias en el bentos del arrecife o en la columna de agua (Sorokin, 1993)
	Control del equilibrio CO ₂ /Ca	Biogeoquímico	Procesos bioquímicos de fijación, liberación y almacenamiento de carbono y calcio	Corales, algas y foraminíferos fijan y construyen estructuras de carbonato cálcico que son la base del desarrollo arrecifal (Wiebe, 1988)
SERVICIOS SOCIALES Y CULTURALES	Monitoreo y registro de la contaminación	Conocimiento científico	Sistemas extremadamente sensibles usados para monitorear cambios recientes en el ambiente marino, así como los efectos provocados por disturbios humanos	Esqueletos de corales hermatípicos registran niveles de metales en el agua del mar (Dodge & Gilbert, 1984)
	Registro climático	Conocimiento científico	La composición química de los esqueletos de los corales puede ser usada para reconstruir la SST de los trópicos y rastrear las variaciones de salinidad	Corales masivos antiguos depositan capas de esqueleto que varían en grosor y densidad dependiendo de las condiciones ambientales (Barnes & Lough, 1996)
	Apoyo recreativo	Actividades recreativas - ecoturismo	Gran valor recreativo que aporta cuantiosos beneficios económicos, especialmente gracias al turismo y a la creación de empleo	El valor económico del turismo generado por el patrimonio de la Gran Barrera de Coral fue estimado en AUS\$ 682 millones anuales

				(Dixon <i>et al.</i> , 1993)
	Valor estético e inspiración artística	Paisaje - disfrute estético	Fuente de inspiración artística y trabajos visuales	Películas, fotos, pinturas, libros (de Groot, 1992)
	Refuerzo del sustento de comunidades costeras	Social	Bienes y servicios que ayudan a la subsistencia de las poblaciones locales	Los daños en los arrecifes de Filipinas causados por sobrepesca y contaminación provocaron la pérdida del empleo de más de 100.000 pescadores (McAllister, 1988)
	Apoyo de valores culturales y espirituales	Identidad cultural y sentido de pertenencia	Identificación cultural y espiritual que ayuda al mantenimiento de los arrecifes	En el sur de Kenia se desarrollaron rituales religiosos sobre los arrecifes que sirvieron también para regular las reservas pesqueras (McClanahan <i>et al.</i> , 1996)

Asimismo, se han cuantificado muchos de estos servicios de manera monetaria. A nivel mundial, los beneficios netos potenciales por año convertidos a dólares estadounidenses (US\$) de algunos de los siguientes servicios fueron los siguientes: del turismo se obtuvieron \$9.6 billones, de las pesquerías \$5.7 billones, de la protección que suponen para la línea de costa \$9.0 billones y del valor que aporta su biodiversidad \$5.4 billones (Cesar *et al.*, 2003). De la misma manera, para la región del Caribe, estos beneficios supusieron \$2.7 billones del turismo, \$395 millones de las pesquerías y \$944 millones-\$2.8 billones de la protección de la línea de costa (Burke & Maidens, 2004).

En 2014 se estimó el valor social, cultural y económico de los arrecifes de coral en 1 trillón de US\$ (Costanza *et al.*, 2014). Por otro lado, un estudio del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) adelantó que la pérdida de los servicios ecosistémicos arrecifales asociados a causas climáticas costará un mínimo de 500 billones de US\$ anuales para el año 2100 (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2015).

1.2. Principales impactos y amenazas sobre los arrecifes coralinos

Los arrecifes de coral están expuestos a numerosos factores de estrés antropogénicos, los cuales continúan aumentando en impacto y rango, tanto a escala local como regional. Algunos de estos impactos son las aguas residuales, la sedimentación, los dragados, la contaminación procedente del petróleo y la contaminación térmica, entre otros (Dubinsky & Stambler, 1996; Erftemeijer *et al.*, 2012). Por otro lado, están sometidos a disturbios biológicos y físicos de origen natural. Las escalas temporal y espacial de estos suelen ser grandes y difíciles de estudiar (Hughes & Connell, 1999).

Por tanto, entre las amenazas antropogénicas a nivel local, destacan: 1) el desarrollo costero mal planificado, que engloba tanto impactos directos (dragados o relleno de tierras), como los indirectos (i.e. contaminantes y sedimentos procedentes de la escorrentía); 2) la contaminación procedente de cuencas terrestres, especialmente por actividades humanas de deforestación, que generan grandes cantidades de sedimentos arrastrados por la escorrentía, así como la actividad agrícola, la cual produce pesticidas que acaban siendo transportados y dispersados por la costa y los arrecifes; 3) la contaminación y daño procedentes del mar, representados por la gran flota de embarcaciones comerciales, recreativas y de pasajeros que rondan estas áreas cada día, aportando amenazas potenciales, como son la contaminación por aguas de caño, fugas de combustible, desechos sólidos o especies invasivas, y, por último, 4) la sobrepesca y pesca destructiva, las cuales pueden producir efectos cascada, desestabilización de ecosistemas o reducción de la resiliencia del arrecife, entre otros efectos (Burke *et al.*, 2011). Una de estas consecuencias es el descenso de biomasa en niveles tróficos superiores (en términos de tamaño máximo y medio de las especies), así como la reducción de su potencial reproductivo (Sala, 2015).

De igual manera, entre las amenazas naturales más notables se encontrarían las siguientes: blanqueamiento, enfermedades, tormentas, huracanes, brotes de la estrella de mar corona de espinas o de erizos de mar, y cambios en el nivel o temperatura del mar (Magnus *et al.*, 2000). Por otro lado, estudios de calcificadores marinos indican que la mayoría muestran una calcificación reducida con un aumento de la acidificación del océano (Kroeker *et al.*, 2010).

La temperatura del mar en los trópicos se ha incrementado en casi 1°C en los últimos 100 años, y continúa aumentando actualmente a un ritmo de 1-2 °C por siglo. Esto ha provocado que los arrecifes formadores de corales se encuentren actualmente muy cerca de su tolerancia térmica máxima (~30-32°C) (Hoegh-Goldberg, 1999). Este incremento de temperatura perturba la habilidad de las zooxantelas para fotosintetizar, y puede causar la producción de sustancias químicas tóxicas que dañan las células (Hoegh-Guldberg & Jones, 1999). Los corales se blanquean (es decir, se tornan pálidos, blanquecinos) como resultado de una variedad de tensiones, tanto naturales como de origen antropogénico, las cuales causan la degeneración y pérdida de las zooxantelas de los tejidos (Westmacott *et al.*, 2000). Estos cambios, además de las variaciones en la temperatura del mar, pueden

deberse a salinidades inusualmente altas o bajas, amplias variaciones lumínicas o a la presencia de contaminantes o enfermedades (Lough & Wilkinson, 2017).

El último gran evento registrado (2014-2017) supuso el record global durante 3 años consecutivos de temperatura media de la superficie marina (Blunden & Arndt, 2017). Este record de temperaturas acaecido durante este periodo estuvo asociado con el fenómeno conocido como El Niño-Oscilación Sur (ENOS; Blunden & Arndt, 2017). ENOS es un fenómeno climático originado en el Océano Pacífico pero que tiene amplias consecuencias en todo el mundo, y está especialmente asociado a sequías e inundaciones (Kovats *et al.*, 2003). Con fines cuantitativos, este fenómeno es declarado cuando se suceden intervalos de 5 meses en los que las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST por sus siglas en inglés) en la región 3.4 de El Niño (5° N – 5°, 120° - 170° W; Figura 1) exceden los 0.4 °C (Trenberth, 1997).

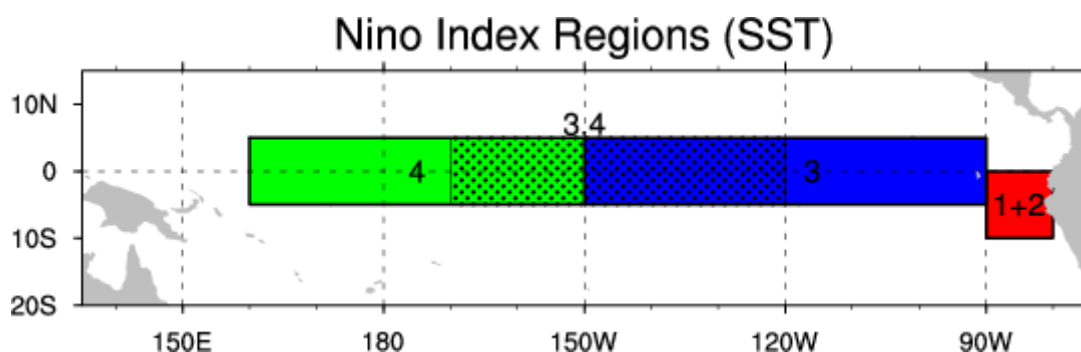


Figura 1. Esquema de regiones utilizadas para clasificar los índices de El Niño. Fuente: Trenberth, 2021.

1.3. Antecedentes en el Caribe costarricense

De acuerdo con la última identificación de prioridades de conservación de la biodiversidad marino-costera nacional, los arrecifes coralinos son uno de los 25 elementos focales de manejo prioritarios del país (Alvarado *et al.*, 2011).

Independientemente del nivel de desarrollo, se pueden describir tres áreas arrecifales en el Caribe Sur, claramente distinguidas y reconocidas. Estas se distribuyen de norte a sur de la siguiente manera: un arrecife de franja entre Moín y Limón, arrecifes de franja y parche (así como bancos carbonatados) en el Parque Nacional de Cahuita y, por último, arrecifes de franja y parche junto a bancos carbonatados y una incipiente cresta de algas entre Puerto Viejo y Punta Mona (Cortés *et al.*, 2009). De todos estos, el arrecife de Cahuita es el único bien desarrollado (Cortés & Risk, 1985).

En el Caribe Sur, los arrecifes de coral han experimentado una evolución particular desde que comenzaron a realizarse estudios en la década de 1970 hasta la actualidad. En

los años 80 se produjo una degradación intensa que provocó el descenso de la cobertura de coral en el Parque Nacional Cahuita de un 40% a un 10% en un lapso de 10 años (Cortés, 1996). Esta disminución está principalmente asociada a varios eventos. El primero de ellos fue el fenómeno de El Niño que tuvo lugar en 1982-83, el cual dio lugar a un calentamiento anómalo de las aguas que provocó un amplio blanqueamiento y muerte coralina (Cortés *et al.*, 1984). El segundo evento fue la muerte masiva del erizo de mar negro, *Diadema antillarum* (Philippi, 1845), un herbívoro con un importante rol ecológico en los arrecifes (Murillo & Cortés, 1984), que se encarga de controlar la cobertura de macroalgas y cuya reducción puede significar en un excesivo aumento de estas últimas (Olmeda-Saldaña *et al.*, 2021). En general, se ha observado una disminución continua de estas poblaciones en la zona, pasando de existir densidades de 3,6-8,8 ind m⁻² antes de 1983 (Valdez & Villalobos, 1978) a 0,3-0,7 ind m⁻² en 2004 (Alvarado *et al.*, 2004). Por último, para 1983 se observó la muerte masiva del abanico de mar, *Gorgonia flabellum* (Linnaeus, 1758) (Guzmán & Cortés, 1984). Estos disturbios, en combinación con la enorme carga de sedimentos terrígenos causó el decline de los arrecifes (Cortés, 1994). En la década de los 90 se mantuvo esta tónica, sucediéndose además nuevos fenómenos extremos como el terremoto de Limón en 1991 (7.5 en la escala Richter), el cual elevó la costa hasta 1.9 m en algunas zonas (Cortés *et al.*, 1992). Asimismo, hubieron otros eventos de blanqueamiento como el de 1995, también relacionado con el calentamiento provocado por el fenómeno ENOS (Jiménez, 2001). Todo esto provocó que se alcanzasen coberturas de coral de tan solo 2-3% (Fonseca, 2003). Sin embargo, en la primera década de los 2000 comenzó una mejora paulatina, midiéndose coberturas de coral vivo en Cahuita de entre 15-17% para el año 2004 (Fonseca *et al.*, 2006).

Además del de Cahuita, hay otros arrecifes menos desarrollados pero de considerable interés en esta zona. En el presente estudio se tomaron datos de Puerto Viejo, Punta Cocles y Punta Uva (Figura 2). En estos lugares se han realizado menos estudios pero aún así se tiene información sobre porcentajes de coral vivo. Alrededor de Puerto Viejo, los arrecifes están mayoritariamente muertos debido a la sedimentación, la extracción del coral para la venta de souvenirs, las aguas residuales y los desechos sólidos (Cortés *et al.*, 2009). En Punta Cocles se ha observado históricamente una mejora en la cobertura de coral, pasando de tener un 5% en 1983 (Cortés & Guzmán, 1985) a un 16% en 2002 (Fernández & Alvarado, 2004). De Punta Uva a Punta Mona, los porcentajes de coral vivo son bajos, pero las condiciones del arrecife en terminos de diversidad de especies y

salud son buenos (Cortés *et al.*, 2009). Por último en Manzanillo, la última revisión realizada indico que el porcentaje de coral vivo era ligeramente superior al 7% (Fonseca, 2003).



Figura 2. 1ª imagen: costa del Caribe de Costa Rica y Áreas Protegidas (en rojo: área de estudio). Fuente: Cortés, 2016. 2ª imagen: puntos de muestreo (Globos rojos: A-D) del estudio en el Caribe sur de Costa Rica. Fuente: Google Earth.

Estas reducciones en el porcentaje de coral vivo, y la consecuente degradación de los arrecifes coralinos se ha visto dada por varias causas. De entre los fenómenos de origen antropogénico, el más mencionado por la bibliografía es la sedimentación. Este fenómeno tiene una mayor ocurrencia en zonas no protegidas, así como en cuencas deforestadas (Fonseca & Gamboa, 1999). Esta problemática viene dada desde finales de la década de 1970, en donde se identificaron que las principales fuentes de sedimento eran la deforestación de cuencas y las malas prácticas agrícolas (Cortés, 1994).

La mayor amenaza, relacionada con el cambio climático, para los corales del Caribe, proviene de los impactos directos originados por el aumento de la temperatura superficial del mar (SST) (Simpson *et al.*, 2009). En este estudio se realizó una revisión histórica de los fenómenos de blanqueamiento ocurridos en el Mar Caribe, y más específicamente en el sector sur de Costa Rica, así como un seguimiento de las alertas de blanqueamiento emitidas para la región en los últimos 10 años. Eventos masivos de blanqueamiento llevan registrándose en el Caribe desde hace casi 40 años. El primer evento de gran magnitud fue visto en 1983, seguido por los eventos de 1988, 1995, 1998 y 2005 (Wilkinson & Souter, 2008). Por último, el evento global de blanqueamiento acaecido entre 2014 y 2017 fue el más largo, extenso, intenso (en términos de estrés térmico acumulado) y probablemente el más dañino (en términos de mortalidad coralina) jamás evaluado (Eakin *et al.*, 2017).

1.4. Participación ciudadana

El término ciencia ciudadana se define como la práctica de involucrar a la sociedad en proyectos científicos que generen datos e información fiable que pueda ser usada por científicos, tomadores de decisiones o el público general (McKinley *et al.*, 2017). En este sentido se podría decir que es “la intervención de la sociedad civil en lo público” (Cunill, 1991). Hoy en día, la participación ciudadana contribuye en múltiples proyectos sobre cambio climático, biología de la conservación, restauración ecológica, monitoreo de la calidad del agua y ecología poblacional (Silvertown, 2009).

En la Declaración de Río de 1992 sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD, 1992), se afirma en el Principio 10 que “el mejor modo de tratar las cuestiones ambientales es con la participación de todos los ciudadanos interesados, en el nivel que corresponda [...]. Los Estados deberán facilitar y fomentar la sensibilización y la participación de la población poniendo la información a disposición de todos. Deberá proporcionarse acceso efectivo a los procedimientos judiciales y administrativos, entre éstos el resarcimiento de daños y los recursos pertinentes”. Estudiar patrones a gran escala requiere la adquisición de una enorme cantidad de datos. Además, esta recolecta puede estar condicionada a procesos de años o incluso décadas (Bonney *et al.*, 2009).

Se ha comprobado que la participación comunitaria es realmente útil como respuesta a impactos que pongan en peligro la integridad ambiental de estas poblaciones, pero también como herramienta para contribuir a la recolección de datos científicos (McKinley *et al.*, 2015). Los beneficios directos de usar *científicos ciudadanos* en restauración son potenciados cuando se dan además oportunidades educativas a la población (Hesley *et al.*, 2017).

En Costa Rica, un ejemplo de participación ciudadana a destacar es el que se desarrolla en el modelo de gobernanza de co-manejo del Parque Nacional Cahuita (Medaglia, 2016), localizado en el Caribe Sur del país, muy cerca de la zona de estudio.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El Caribe Sur de Costa Rica es una región perteneciente al Área de Conservación La Amistad Caribe (ACLAC), la cual es una Unidad Territorial Administrativamente delimitada del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). En esta Área de Conservación se tiene la visión de que la

biodiversidad se conserva, maneja y utiliza en forma sostenible propiciando la descentralización de competencias hacia las organizaciones de la sociedad civil, garantizando el acceso y uso equitativo de los recursos naturales por la población local (SINAC, 2021).

La mayoría de las investigaciones e información publicada sobre esta área en materia de conservación y medio ambiente está centrada en las Áreas Protegidas (Parque Nacional Cahuita y Refugio de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo). Por este motivo, se pretende realizar una investigación sobre el estado de salud de los arrecifes comprendidos en el espacio existente entre estas dos zonas. El propósito de este trabajo consiste no solo en conocer el estado de salud de los arrecifes de esta región, sino principalmente en adquirir una visión global e integral del funcionamiento, complejidad y dinamismo de estos ecosistemas, y cómo pueden ofertar una serie de beneficios y usos a la sociedad, tanto directa como indirectamente. Por este motivo, uno de los pilares del estudio fue la creación de un equipo de monitoreo conformado por habitantes locales de la zona (pertenecientes al Centro de Buceo Comunitario Embajadores y Embajadoras del Mar). Mediante este procedimiento se trató de poner en práctica un ejercicio de ciencia ciudadana, comprobando simultáneamente el nivel de conocimiento, organización y compromiso ambiental que albergaba este grupo de personas. Por último, se pudo examinar de primera mano que la participación y entendimiento de asuntos ambientales relacionados con el medio natural que nos rodea, permite no solo ser partícipes en la preservación y cuidado de estos lugares, sino que también ayuda a fomentar y desarrollar una serie de valores humanos de una valía enorme para las futuras generaciones.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

A) Objetivo general

1. Evaluar la condición de varios arrecifes de coral en la zona comprendida entre Puerto Viejo y Punta Uva, priorizando cobertura de sustrato, con la ayuda de la participación ciudadana.

B) Objetivos específicos

- I. Analizar el comportamiento histórico del estrés térmico en el Caribe Sur de Costa Rica.
- II. Establecer un proyecto colaborativo con el Centro de Buceo Comunitario Embajadores y Embajadoras del Mar para el monitoreo de los arrecifes coralinos de la zona.

- III. Establecer una serie de recomendaciones para la mejor gestión de los arrecifes coralinos del Caribe Sur de Costa Rica.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Región biogeográfica

Según la clasificación biogeográfica de Stehli y Wells (1971) sobre los arrecifes coralinos del mundo, el área de estudio se encuentra demarcada dentro de la región biogeográfica Caribe-Atlántico, más específicamente en la subprovincia Caribe (Figura 3).

El Caribe es una región biogeográfica única, con una compleja historia geológica que comenzó hace 40 millones de años (Eoceno medio) y culminó en el Plioceno (5-2.5 millones de años) con el afloramiento del istmo de Panamá (Iturralde-Vinent, 2005). El Caribe está en constante transformación y se han generado barreras y caminos temporales que han permitido y bloqueado la migración de especies, provocando en particular el aislamiento entre la flora y fauna del Pacífico y del Atlántico, e incrementando la divergencia evolutiva (Iturralde-Vinent, 2005).

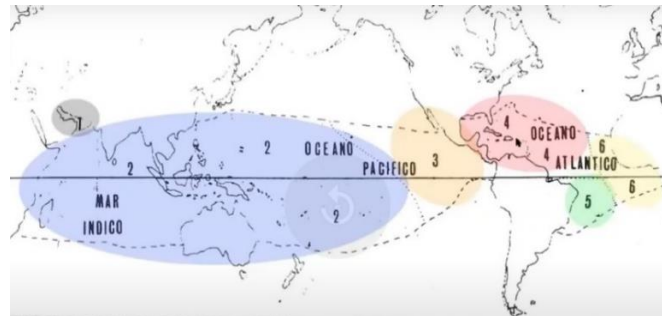


Figura 3. Regiones biogeográficas de los arrecifes de coral. En rojo (4), la subprovincia del Caribe. Fuente: Stehli & Wells (1971).

El Caribe Sur de Costa Rica es un territorio que mezcla el bosque tropical lluvioso y una amplia diversidad de ecosistemas marino-costeros con diversas culturas como los indígenas Bribri, los descendientes afroamericanos, los mestizos y una creciente comunidad de extranjeros residentes (SINAC, 2016). El clima es cálido y húmedo, produciéndose precipitaciones durante todo el año (Cortés, 2016). Sin embargo, estas alcanzan su pico entre noviembre y diciembre, mientras que se ven reducidas en marzo y abril (Alfaro, 2002).

La costa del Caribe costarricense se extiende 212 km y está conformada principalmente de playas arenosas de gran energía, las cuales se intercalan con

promontorios carbonatados en el sector sur. Estos promontorios tienen su origen en arrecifes fósiles provenientes del Pleistoceno y Holoceno (Cortés *et al.*, 2009). Los ríos transportan grandes cargas de sedimentos desde las zonas montañosas a las planicies costeras, distribuyendo estos sedimentos (Cortés *et al.*, 1998).

Las principales corrientes a lo largo de la costa fluyen en dirección noroeste-sureste, como parte del persistente giro ciclónico Panamá-Colombia (Mooers & Maul, 1998). Estas corrientes distribuyen sedimentos, nutrientes, contaminantes y organismos por toda la costa.

3.2. Puntos de muestreo

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los fines de esta investigación era monitorear y evaluar los arrecifes comprendidos entre las dos Áreas Protegidas de esta región (Figura 4), el Parque Nacional Cahuita (Anexo 1), y el Refugio Mixto de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo (Anexo 2). Tres de los cuatro puntos de muestreo pertenecen a la zona marina del REGAMA, de acuerdo con los límites del Área Protegida. Aun así, al encontrarse tan cerca del límite del Refugio y no pertenecer a la zona terrestre, resulta más complejo dotar a estos lugares de protección.

En la Figura 2 aparecen los puntos de muestreo en los que se realizaron transectos para recopilar datos relativos al estudio. Algunas razones por las que se escogieron estos puntos fueron: su cercanía al lugar de residencia de los miembros del Centro Comunitario, el hecho de que estas zonas arrecifales eran bien conocidas por dichos miembros, y, por último, con el objetivo de encontrar un lugar en el que poder desarrollar a posteriori un proyecto de restauración coralina. A continuación, se realiza una breve descripción de cada uno de estos lugares.

A) Chino Beach, Puerto Viejo (9°39'28'' N - 82°45'22'' O): Los arrecifes de Puerto Viejo están bajo una gran presión ambiental debido a la sedimentación, desechos urbanos y a la colecta irrestricta (Cortés, 1985). Se trata de un arrecife de franja somero, con algunas lagunas y pequeños parches diseminados (Anexo 3). Está muy expuesto a la presión turística, tanto por bañistas como por otro tipo de actividades recreativas y/o deportivas (surfistas, motos de agua, etc.).

B) Caracola, Punta Cocles (9°38'42'' N – 82°43'08'' O): El arrecife de Punta Cocles (Anexo 4) es considerado de tipo marginal, posee unas barreras calcáreas, paralelas y cercanas a la costa (Cortés, 1992). A 2 metros de profundidad se encuentra una plataforma

de unos 50 metros de largo, cortada, cerca del borde, por canales de hasta 6 metros de profundidad, semejantes a contrafuertes (Cortés, 1985). El arrecife de Punta Cocles está aislado del impacto antropogénico directo y solamente hay impactos menores.

C) Selvin, Punta Uva (9°38'20'' N – 82°42'04'' O): Este arrecife franjeante es de tipo marginal y apenas ha sido estudiado de acuerdo a la bibliografía consultada. Se encuentra aproximadamente a 800 m al oeste del mirador de Punta Uva (Anexo 5), desarrollándose directamente desde la playa contigua a este lugar. Debido a la baja afluencia de turistas (al no tratarse de un enclave tan famoso como el mirador de Punta Uva) no está sometido a impactos directos provenientes de este sector, aunque se intuye que pueda estar expuesta a otros factores de estrés como la sedimentación o la presencia de especies invasoras (pez león).

D) Arrecife, Punta Uva (9°38'41'' N – 82°41'07'' O): El arrecife lo constituye una plataforma con altos (1 m) y bajos (4 m). El borde se encuentra a 4 m y en unos pocos metros baja hasta 8 m (Cortés & Guzmán, 1985). Se trata de un lugar de considerable afluencia turística y bastante expuesto al oleaje (Anexo 6).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Antes de seleccionar los puntos de muestreo, se realizó un estudio bibliográfico durante los meses de agosto y septiembre 2020 sobre las principales estructuras arrecifales de la región, su desarrollo y evolución en los últimos 50 años, así como su cobertura de coral y biodiversidad. Asimismo, durante estos dos meses se realizaron visitas periódicas a las zonas de interés, y mediante observaciones a pulmón (snorkel) se pudo comprobar de primera mano cuál era el estado actual de estos arrecifes someros. Estas observaciones no están recogidas en este trabajo ya que se realizaron antes de que tuviera lugar su inicio. También se tomaron fotografías submarinas de las principales especies de coral encontradas, tanto colonias en buen estado como otras afectadas por diferentes afecciones y enfermedades.

Se deben tener en cuenta varios factores limitantes que ralentizaron la realización del estudio: en primer lugar, las restricciones horarias existentes por la pandemia de la COVID-19 imposibilitaron realizar durante estos primeros meses actividades de campo fuera de un horario muy limitado (6 am a 9 am). Por otro lado, el material existente para realizar el trabajo de campo fue bastante escaso, y las posibilidades de adquirir piezas nuevas resultaron de suma dificultad.

4.1. PRONAMEC

Una vez escogidos los puntos de muestreo, se procedió a seleccionar la metodología de muestreo. Debido a que se iba a trabajar coordinadamente con el Centro Comunitario, se decidió utilizar una metodología conocida por ambas partes, y aquella escogida fue la del Programa Nacional de Monitoreo Ecológico (PRONAMEC) para arrecifes de coral (SINAC, 2016).

El PRONAMEC es una herramienta dirigida al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) que permite el monitoreo a largo plazo de los indicadores más importantes en las formaciones coralinas, de manera que cada Área Marina Protegida (AMP) conozca el estado y los cambios que se presenten a lo largo del tiempo en estos ecosistemas. Este protocolo brinda la información necesaria para la generación de datos y su interpretación, teniendo valores de salud del ecosistema y ámbitos de variación permisible una vez se comience a implementar el monitoreo; por lo que puede ser utilizado tanto por tomadores de decisiones y funcionarios, como por actores locales involucrados en el manejo de las áreas marinas protegidas del país (SINAC, 2016).

Se aprovechó el mes de octubre para realizar el trabajo de campo, coincidiendo este mes con el “verano” o época seca de la región, pudiéndose disfrutar de condiciones hidrodinámicas del mar más apacibles, con corrientes leves y oleajes prácticamente inexistentes.

Las principales características del muestreo fueron las siguientes:

- Se realizaron entre 8 y 10 transectos en los cuatro puntos de muestreo (Figura 4). La diferencia en el número de muestreos de un lugar a otro se debió a complicaciones técnicas y organizativas durante algún día en particular.
- Los muestreos fueron de tipo somero, próximos a la costa (0-50 m) y a profundidades de entre 0 y 2 m (Figura 5). Por ello, se realizaron a pulmón (snorkel).



Figura 4. Miembros del Centro Comunitario midiendo cobertura de sustrato mediante la técnica punto intercepto.

- Se utilizó la metodología de punto intercepto la cual consiste en identificar el tipo de sustrato existente bajo una cinta métrica (Figura 6), cada 20-25 cm, a lo largo de transectos de 10 m de longitud. Cada elemento reconocido durante el transecto lleva asociado un código que se apunta en una tablilla acrílica.



Figura 5. Cinta métrica depositada en el fondo marino para llevar a cabo la medición de cobertura de sustrato.

- Los corales fueron identificados por especie aunque posteriormente se agruparon en las categorías: coral vivo, coral blanqueado, coral enfermo y coral muerto (Figura 7).



Figura 6. De izquierda a derecha: *Porites astreoides* vivo, *Millepora complanata* blanqueado, *Siderastrea siderea* enfermo, *Pseudodiploria strigosa* muerto.

- En el caso de las macroalgas, se utilizaron 3 categorías según los morfotipos: macroalgas carnosas (verdes, pardas y rojas), algas coralinas costrosas (ACC) y algas filamentosas (turf).
- Se contabilizó el porcentaje de otros elementos bióticos dentro de las siguientes categorías: esponjas, anémonas y corales suaves (octocorales). Todos ellos fueron incluidos en la categoría “Otros”.
- Se identificaron los tipos de sustrato abiótico existentes: sedimento (grano fino, se suspende fácilmente en la columna de agua), arena (grano grueso, cae rápidamente al fondo) y roca (sustrato duro, no cubierto por ningún elemento biótico anterior). El conjunto de ellos fue englobado en la categoría “Arena”, por ser este el sustrato abiótico más presente.
- Por último, en cada lugar de muestreo se midió la rugosidad del arrecife haciendo uso de una cadena de 10 m de longitud que se depositó siguiendo el contorno del fondo marino. Posteriormente, se mide la distancia total en línea recta del punto de inicio al punto final de la cadena (Rogers *et al.*, 2001). Este procedimiento se

repite tres veces por sitio. La rugosidad y el índice de rugosidad se calculan con las siguientes fórmulas:

$$\text{Rugosidad} = \frac{\text{Distancia recorrida por la cadena sobre el fondo}}{\text{Largo total de la cadena}}$$

El índice de rugosidad (IR) corresponde a la fórmula: 1-R (Aronson & Precht, 1995), donde valores cercanos a 0 representan arrecifes planos, mientras que valores cercanos a 1 representan arrecifes rugosos o más complejos morfológicamente.

- ❖ Adicionalmente, gracias al equipamiento aportado por el Centro Comunitario, y a la colaboración de una buza capacitada para supervisar el grupo, se pudieron realizar dos transectos SCUBA (Figura 8) en Puerto Viejo a profundidades de 3-4 m.



Figura 7. Transecto punto intercepto con SCUBA (4 m de profundidad).

Se utilizó el programa Microsoft Excel para almacenar, organizar y clasificar todos los datos de cobertura de sustrato. Estos datos se analizaron mostrando el porcentaje de cobertura de sustrato de cada uno de los elementos, obteniéndose la desviación estándar de para cada lugar de muestreo.

4.2. Coral Health Chart

El blanqueamiento de coral está caracterizado por la pérdida de los dinoflagelados simbios (género *Symbiodinium*) y/o la pérdida de la pigmentación de estos simbios (Brown, 1997). Por lo tanto, para poder cuantificar el grado de blanqueamiento de los corales se utilizó la tabla de salud coralina (*Coral Health Chart*; Figura 8) de CoralWatch (Siebeck *et al.*, 2006). Esta herramienta es una carta estandarizada con referencias crómicas, asequible, flexible y no invasiva que cualquier persona puede usar para realizar una evaluación amplia y rápida del cambio de la condición de salud del coral

(Siebeck *et al.*, 2006). La carta utiliza una escala de 6 puntos dentro de 4 tonalidades de color que registran cambios en procesos de blanqueamiento.

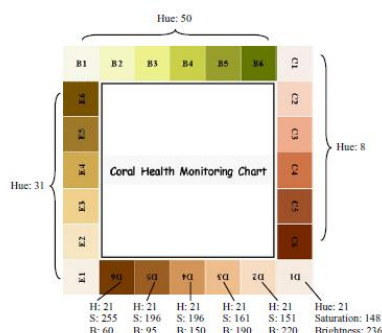


Figura 8. Coral Health Chart. Hue: tonalidad; Saturation: saturación; Brightness: brillo. Fuente: Siebeck et al., 2006.

Las mediciones con el *Coral Health Chart* se basan en que los observadores encuentren la asociación más precisa entre el color del coral analizado y el color de la carta (Siebeck *et al.*, 2008). Incluso con limitado entrenamiento los observadores son capaces de utilizar esta técnica con precisión (Siebeck *et al.*, 2006).

Por otro lado, la metodología del *Coral Health Chart* no diferencia entre diferentes especies de coral, sino que simplifica esta clasificación en función del tipo morfológico. Por tanto, se tienen 4 tipos morfológicos (Figura 9) que los observadores deben ser capaces de identificar.



Figura 9. Tipos morfológicos utilizados mediante la metodología Coral Health Chart. Boulder: masivo; Plate: plato; Branching: ramificado; soft: blando. Fuente: Siebeck et al., 2006.

Para poner en práctica esta metodología se siguieron las siguientes directrices: 1) se determinó realizar esta evaluación en tres de los cuatro lugares de muestreo (Puerto Viejo, Punta Cocles y Punta Uva; Anexos 3, 4 y 5); 2) Se dividió cada uno de estos puntos en varias subáreas y se estableció una separación de unos 10-15 m entre los integrantes del equipo. De esta manera, cada observador realizó un transecto aleatorio en donde cada dos patadas de aleta se tomaba el dato de coral más cercano. Así, cada observador tomó datos de 20 corales, llegando a almacenar información de 100 corales en cada uno de los lugares de muestreo. 3) Estos muestreos se realizaron durante la primera y segunda semana de noviembre.

El objetivo de utilizar esta metodología fue el de comparar los resultados obtenidos con aquellos proporcionados por la metodología PRONAMEC, así como obtener una mayor información respecto al fenómeno de blanqueamiento que presumiblemente iba a tener lugar en esta región desde septiembre a diciembre, de acuerdo con los datos satelitales de la NOAA (The Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology, 2020a).

4.3. *Coral Reef Watch*

Para evaluar y monitorear el blanqueamiento coralino acaecido en el Caribe Sur de Costa Rica en los últimos años, y durante la época en la que se realizó el estudio, se utilizó el programa *Coral Reef Watch* de la NOAA (<https://coralreefwatch.noaa.gov/>).

El programa *Coral Reef Watch* (CRW) utiliza medidas satelitales en tiempo casi real de la temperatura superficial del mar (SST) para monitorear el estrés térmico. Estos datos proporcionan medidas actualizadas de áreas precisas que están actualmente en riesgo por blanqueamiento de coral (Simpson *et al.*, 2009).

La última versión del programa (v3.1), además de medir la SST, también monitoriza las anomalías de la SST, los puntos calientes de blanqueamiento (*Coral Bleaching HotSpot*) y el estrés térmico acumulado (*Degree Heating Week*, DHW). La combinación de estos parámetros proporciona al programa una herramienta para generar alertas de blanqueamiento (Skirving *et al.*, 2020).

A continuación, se explicarán resumidamente los parámetros “*Coral Bleaching HotSpot*” (HS) y “*Degree Heating Week*” (DHW) ya que son los que conforman principalmente la generación de alertas de blanqueamiento (Skirving *et al.*, 2020).

- ***Coral Bleaching HotSpot* (HS):** los corales son vulnerables al blanqueamiento cuando la SST excede las temperaturas medias del mes más cálido del año. Por lo tanto, se obtiene este valor de la diferencia entre la SST dada en un día concreto y la SST media del mes más cálido del año (MMM: *Maximum Monthly Mean*). De esta forma, se tiene un dato diario de HS. Por lo general, se establece en 1°C el límite máximo por el cual la SST no debe superar la MMM (Skirving *et al.*, 2020).
- ***Degree Heating Week* (DHW):** para que se dé un fenómeno de blanqueamiento coralino masivo, el arrecife debe estar sometido a un periodo prolongado de estrés térmico. Mediante esta variable, el programa es capaz de monitorear puntos

calientes o *HotSpots* mayores de 1°C durante periodos de 12 semanas. Por lo tanto, para obtener el valor numérico en un día dado, se deben tomar los días en que se obtuvo un $HS > 1$ durante este periodo (12 semanas, 84 días), sumarlos y dividir entre 7. (Skirving *et al.*, 2020).

La Tabla 2 muestra los 5 niveles de alerta de blanqueamiento establecidos por CRW en función de los parámetros descritos anteriormente, y su efecto en los corales.

Tabla 2. Niveles de estrés por blanqueamiento coralino del CRW. Fuente: NOAA Coral Reef Watch 5km Methodology Page, 2021.

Nivel de Estrés	Definición	Efecto
Sin estrés	$HotSpot \leq 0$	Ninguno
Vigilancia por blanqueamiento	$0 < HotSpot < 1$	Ninguno
Advertencia de blanqueamiento	$1 \leq HotSpot$ and $0 < DHW < 4$	Posible blanqueamiento
Nivel 1 de alerta de blanqueamiento	$1 \leq HotSpot$ and $4 < DHW < 8$	Probable blanqueamiento significativo
Nivel 2 de alerta de blanqueamiento	$1 \leq HotSpot$ and $8 \leq DHW$	Probable blanqueamiento severo y alta mortalidad

En resumen, se utilizó este programa para clasificar y evaluar los fenómenos de blanqueamiento que habían tenido lugar en los últimos 10 años en la región (en función de las alertas), con el fin de poder predecir en un futuro qué época del año tiene una mayor predisposición a sufrir este fenómeno. Por otro lado, también se intentó analizar si existe una correlación entre estos eventos y los fenómenos de El Niño-Oscilación Sur (ENOS). Para ello, se identificaron los eventos notificados en la bibliografía y se comprobó si coincidían temporalmente con los fenómenos de blanqueamiento en la región o si existía algún tipo de retardo entre un suceso y otro. Asimismo, se analizaron las anomalías térmicas anuales en la zona en los últimos 50 años, así como aquellas específicas de los meses más cálidos. Esto se realizó para observar si coincidían los reportes sobre blanqueamiento con los datos de anomalías térmicas registrados en dichos periodos de tiempo. Las anomalías térmicas se extrajeron también de la página web de la NOAA (NOAA, 2021).

4.4. Participación ciudadana

Como se ha mencionado en la justificación, uno de los objetivos de la investigación consistió en la formación de un equipo de trabajo compuesto por ciudadanos locales. Para

ello, se exploraron las opciones disponibles, y se comprobó si existían organizaciones o grupos que ya trabajaran de manera autónoma en la región. Finalmente, se contactó con el Centro Comunitario mencionado anteriormente. Acto seguido, se realizó una planificación con los miembros que iban a conformar el equipo y se comentaron todos los detalles para iniciar los muestreos en octubre.

Para poder cuantificar la contribución que supuso para el Centro su inclusión en la realización de los muestreos se les hizo una encuesta (Anexo 7) de manera posterior. Estas cuestiones estuvieron relacionadas con el conocimiento de los participantes sobre la ecología y biodiversidad de los arrecifes coralinos y el uso de las metodologías de muestreo empleadas.

5. RESULTADOS

A continuación, se expondrán los resultados de cobertura de sustrato y rugosidad obtenidos con el protocolo PRONAMEC para cada uno de los lugares de muestreo, así como los de la metodología *Coral Health Chart*. Por último, y para profundizar en mayor medida sobre el blanqueamiento coralino, se mostrará la información recogida gracias al programa *Coral Reef Watch* (CRW).

Se debe señalar que, a la hora de tratar y transformar los datos de cobertura de sustrato, se tuvieron que realizar algunas correcciones para simplificar los resultados; a pesar de que se identificaron los organismos de coral a nivel de especie, se decidió abarcar a todos ellos en la categoría “Coral Vivo”. De esta manera, se pudo diferenciar aquellos corales en buen estado con los que se encontraron blanqueados, muertos o enfermos. Por otro lado, se decidió agrupar los tres tipos principales de macroalgas en una única categoría, así como el sustrato abiótico (“Arena”). Las otras tres categorías destacadas fueron algas coralinas costrosas (ACC), turf (tapetes algales) y pasto marino. En el apartado “Discusión” se comentará con mayor detalle las particularidades de los resultados, como el género de coral más numeroso, el tipo de macroalga más abundante, otras especies de coral comunes, así como la importancia ecológica de ciertos indicadores como las algas coralinas costrosas o el turf, entre otros.

5.1. PRONAMEC y *Coral Health Chart*

5.1.1. Puerto Viejo (Chino Beach)

En el arrecife de Puerto Viejo (Anexo 3) se realizaron transectos durante el mes de octubre 2020 para medir cobertura de sustrato (mediante la metodología PRONAMEC) y se puso en práctica el *Coral Health Chart* en noviembre con el fin de averiguar si el arrecife se estaba comenzando a recuperar del fenómeno de blanqueamiento masivo presuntamente acaecido durante el mes de octubre y que según las previsiones podía continuar durante este mes (The Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology, 2020b; The Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology, 2020c). A continuación (Figura 10), se muestran los resultados de cobertura de sustrato para el arrecife de Puerto Viejo.

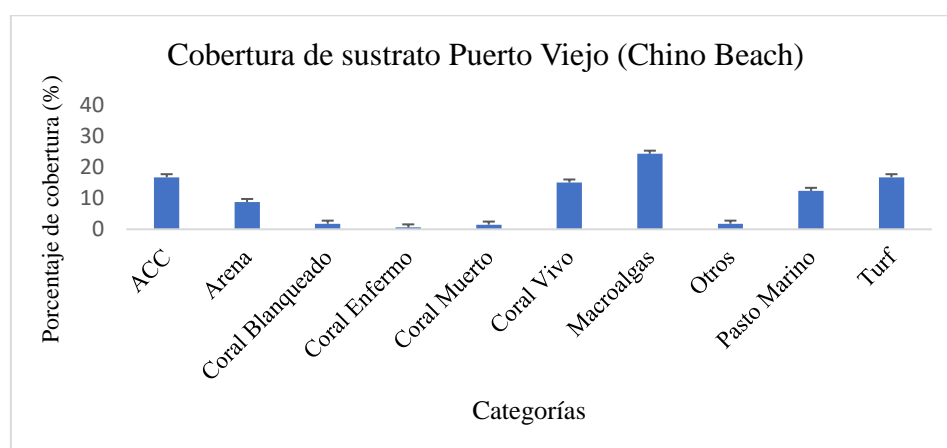


Figura 10. Porcentaje de la cobertura promedio ($\pm 8,3$) de sustrato en el arrecife de Puerto Viejo (Chino Beach) en octubre 2020.

La Figura 10 muestra la cobertura promedio ($\pm 8,3$) del sustrato en donde se observa una predominancia de macroalgas ($24,4 \pm 8,3\%$), seguida de ACC y turf (ambas $16,8 \pm 8,3\%$). El porcentaje de coral vivo fue del $15,1 \pm 8,3\%$, principalmente representado por el género *Pseudodiploria* ($11,2 \pm 8,3\%$), más específicamente por la especie *Pseudodiploria clivosa* de tipo incrustante. La cobertura de coral blanqueado en Puerto Viejo fue del $1,8 \pm 8,3\%$, mientras que el coral muerto y coral enfermo mostraron porcentajes de $1,5 \pm 8,3\%$ y $0,6 \pm 8,3\%$ respectivamente. Sobre el coral total registrado, el coral vivo representó un 79,5% mientras que el blanqueado ocupó un 9,5% y el muerto y enfermo un 7,9% y 3,2% respectivamente. El índice de rugosidad (IR) obtenido fue 0,13 lo que indica un arrecife estructuralmente pobre y plano.

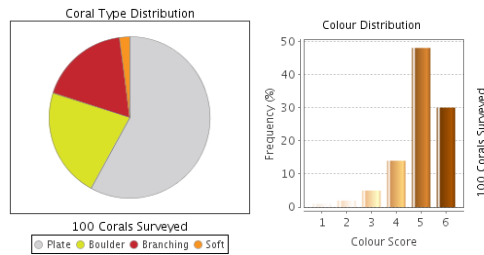


Figura 11. Distribución morfológica y distribución de escalas de color de los corales muestreados en el arrecife de Puerto Viejo (Chino Beach) en octubre 2020.

En cuanto a su distribución morfológica y de color mostrado (Figura 11) del CHC, los resultados ofrecen una distribución dominada por corales tipo plato (se incluyen incrustantes aquí), los cuales representan más de la mitad del total registrados. Los tipos masivo y ramificado agrupan de manera casi equitativa casi todo el porcentaje restante. Por otro lado, una alta proporción ($> 70\%$) muestran la escala de color 5 o 6, mientras que el porcentaje de corales blanqueados (1 o 2) es casi insignificante.

5.1.2. Punta Cocles (Caracola)

En el arrecife de Punta Cocles (Anexo 4) se siguió el mismo procedimiento que en Puerto Viejo. En la Figura 12 se muestran los resultados de cobertura de sustrato, mientras que en la Figura 13 se exponen los datos recogidos por el *Coral Health Chart*.

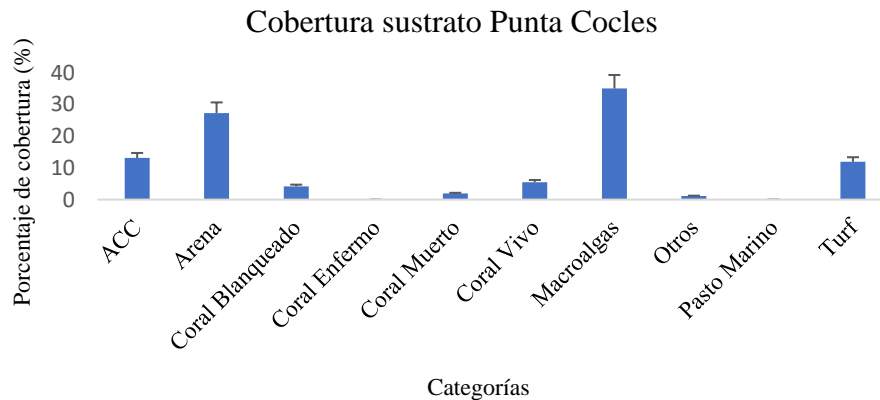


Figura 12. Porcentaje de la cobertura promedio ($\pm 12,2$) de sustrato en el arrecife de Punta Cocles (Caracola) en octubre de 2020.

Los resultados muestran un arrecife dominado por macroalgas ($35,0 \pm 12,2\%$). El segundo elemento más abundante fue el sustrato arena con un $27,3 \pm 12,2\%$. ACC y el turf representaron un $13,1 \pm 12,2\%$ y $11,9 \pm 12,2\%$ respectivamente, mientras que la cobertura de coral vivo fue del $5,5 \pm 12,2\%$. Por otro lado, la cobertura del coral blanqueado fue del $4,2 \pm 12,2\%$, mientras que el coral muerto supuso un $1,9 \pm 12,2\%$. Del todo el coral

medido, destaca que el 36,2% se encontraba blanqueado. El valor del índice de rugosidad (IR) para este arrecife fue de 0,02.

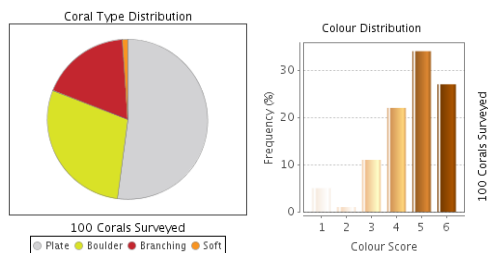


Figura 13. Distribución morfológica y de escalas de color de los corales muestreados en el arrecife de Punta Cocles (Caracola) en octubre 2020.

La Figura 13 (CHC) muestra una distribución marcada por la dominancia de los corales tipo plato (alrededor del 50%), seguidos por los corales masivos y ramificados. Apenas se aprecian corales blandos. En cuanto a la distribución de la escala de color, esta se encuentra más repartida que en Puerto Viejo, siendo los códigos 5, 6 y 4 los más abundantes en orden decreciente. Sin embargo, también se aprecia un porcentaje ligeramente superior al 10% para el código 3 (tonalidad más pálida) y alrededor de un 5% para el código 1 (completamente blanqueado).

5.1.3. Punta Uva (Selvin)

El arrecife denominado Selvin (por su cercanía al restaurante con dicho nombre donde se realizaban asiduamente las reuniones del Centro Comunitario) es una de las dos estructuras pertenecientes al complejo arrecifal de Punta Uva. Este arrecife (Anexo 5) de tipo marginal no cuenta con ninguna referencia bibliográfica precisa, por lo que su estudio e investigación puede resultar de gran interés. En la Figura 14 se muestran los resultados de cobertura de sustrato para esta zona.

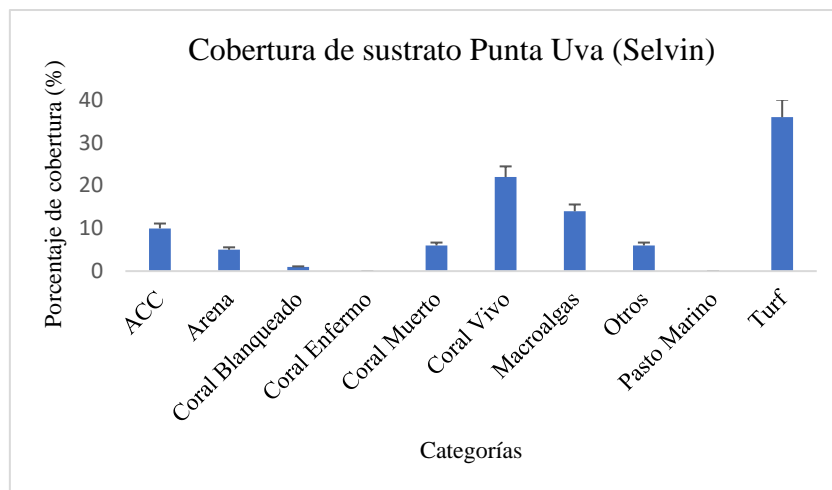


Figura 14. Porcentaje de la cobertura promedio ($\pm 11,4$) de sustrato en el arrecife de Punta Uva (Selvin) en octubre 2020.

El arrecife de Punta Uva (Selvin) muestra una zona dominada por tapetes algales (36,0%). La cobertura de coral vivo fue del 22,0% entre los que destaca la especie *Pseudodiploria clivosa* con un $16,0 \pm 11,4$. El porcentaje de macroalgas fue más bajo que en Puerto Viejo y Punta Cocles con un $14,0 \pm 11,4$. Las algas coralinas costrosas representaron un $10,0 \pm 11,4$ de cobertura, mientras que la categoría “Otros” exhibió un $6,0 \pm 11,4$, principalmente asociado a invertebrados. La cobertura de coral blanqueado fue del $1,0 \pm 11,4$ y el de coral muerto del $6,0 \pm 11,4$. En este lugar, el porcentaje de coral blanqueado representó únicamente el 3,5% sobre el total de estos organismos, sin embargo, el coral muerto fue del 20,7%. El índice de rugosidad (IR) fue del 0,024.

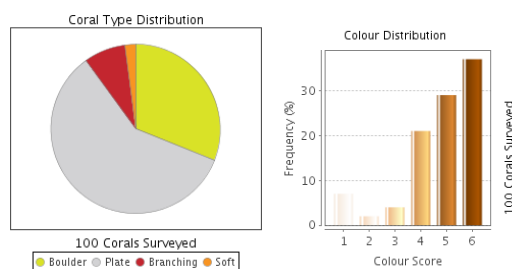


Figura 15. Distribución morfológica y de escalas de color de los corales muestreados en el arrecife de Punta Uva (Selvin) en octubre 2020.

En la figura 15 (CRC) la gráfica de sectores sigue el patrón de Puerto Viejo y Punta Cocles, siendo los corales tipo plato los más abundantes, con una mayor diferencia incluso respecto al resto. En segundo lugar, aparecen los de tipo masivo o redondeado, mientras que los ramificados y blandos registran abundancias menores. El código de color más frecuente es el 6, seguido por el 5 y el 4 en este orden.

5.1.4. Punta Uva (Arrecife)

Además de Selvin, se realizaron otros transectos en la zona de Punta Uva. Esta estructura arrecifal (Anexo 6) se encuentra en una zona de mayor afluencia turística conocida popularmente como Arrecife.

La cobertura de sustrato en este lugar (Figura 16) refleja una distribución bastante repartida, aunque destaca la alta cobertura de coral vivo con un $26,3 \pm 8,9\%$ ($21,6 \pm 8,9\%$ perteneciente a la especie *Pseudodiploria clivosa*) y de pasto marino ($21 \pm 8,9\%$), mientras que las macroalgas representan un $13,7 \pm 8,9\%$ y la arena un $13,8 \pm 8,9$. Las ACC cubren un $11,6 \pm 8,9\%$. La cobertura de coral blanqueado fue del $3,9 \pm 8,9\%$ y el de coral muerto un $0,9 \pm 8,9\%$. Este porcentaje de coral blanqueado supuso un 12,5% del total.

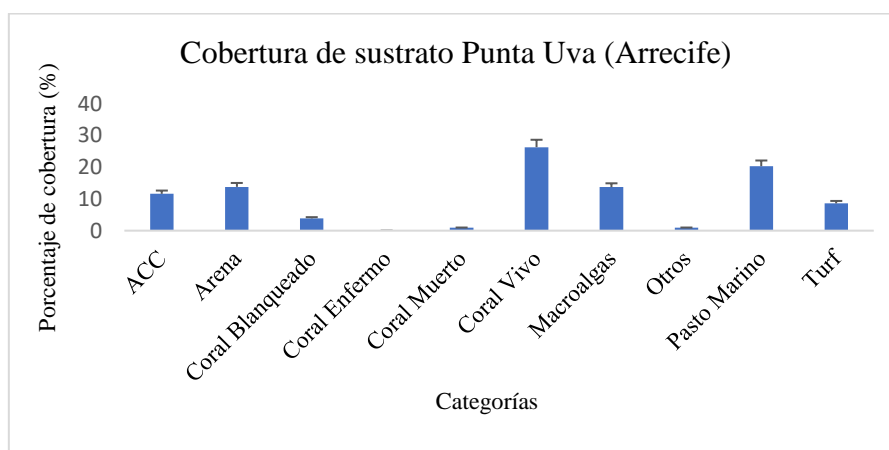


Figura 16. Porcentaje de la cobertura promedio ($\pm 8,9$) de sustrato en el arrecife de Punta Uva (Arrecife) en octubre 2020.

5.2. Blanqueamiento coralino (*Coral Reef Watch*)

Con el objetivo de conocer mejor la evolución del estrés térmico en la zona de estudio, se decidió profundizar en el tema de blanqueamiento a través del programa de la NOAA *Coral Reef Watch*. Para ello, se trató de integrar estos eventos con las anomalías térmicas positivas y los fenómenos de El Niño (ENOS) asociados.

En la Figura 17 se observan las anomalías térmicas anuales a nivel mundial desde 1900 respecto a las temperaturas medias del siglo XX, aunque se debe tener en cuenta que este gráfico realiza la media para la parte terrestre y oceánica. Aún así, se puede observar que desde 1977 todos los años han experimentado una anomalía térmica positiva, lo cual contrasta bastante con el periodo 1900-1940, en el cual se dio el caso contrario (anomalías térmicas negativas).

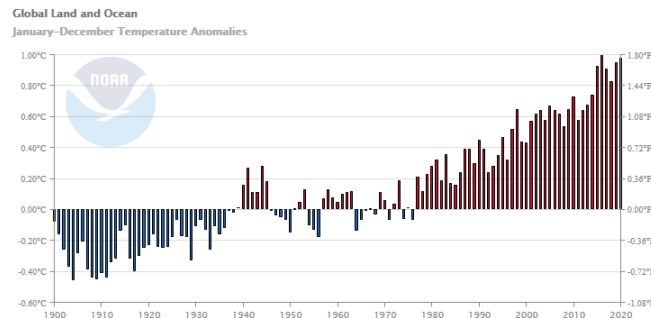


Figura 17. Anomalías térmicas anuales a nivel mundial en el periodo 1900-2020. Fuente: NOAA, 2021.

Por otro lado, si nos centramos en la zona de estudio, se da un caso más particular (Figura 18). Al igual que ocurre para el resto del mundo, de 1900 a 1940 se dan anomalías negativas. Por el contrario, a partir de 1940 tienen lugar en años específicos una serie de anomalías térmicas positivas que exceden con notoriedad la de sus años vecinos, muchos de ellos reflejando anomalías negativas. Las más importantes son la de 1941 (+0.60°C), 1958 (+0.47°C), 1983 (+0.69°C), 1987 (+0.45°C), 1997-1998 (0.58°C; 0.49°C) y por último desde 2014 a 2020, en el que las anomalías térmicas anuales no han bajado ningún año de +0.35 °C, siendo 2015 el año que ostenta la anomalía térmica récord (+0.93°C). Estas anomalías térmicas están establecidas respecto a la media del periodo 1981-2010.

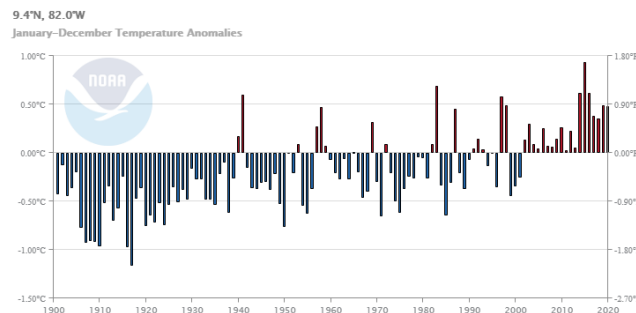


Figura 18. Anomalías térmicas anuales para la zona de estudio (9.4 N – 82.0 W) durante el periodo 1900-2020. Fuente: NOAA, 2021.

La magnitud de ENOS puede ser medida mediante un índice conocido como ONI (*Oceanic Niño Index*; Figura 19), el cual se construye a partir de mediciones de anomalías térmicas positivas o negativas superiores a 0.5°C durante tres meses consecutivos, en comparación con periodos de referencia de 30 años, para el Pacífico Central (5°N – 5°S, 120°-170° W; NOAA, 2021). En la Figura 19 se observan los fenómenos de ENOS durante los últimos 70 años. Los más potentes de El Niño durante este periodo fueron los de 1983, 1997 y 2015, y los de la Niña los de 1973 y 1988.

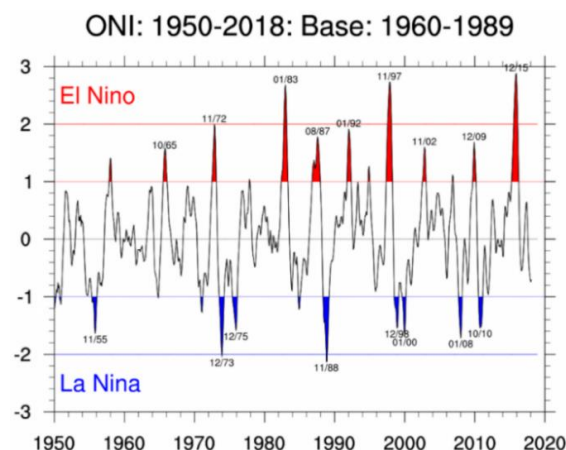


Figura 19. ONI (*Oceanic Niño Index*) para los últimos 70 años, con base en el periodo 1960-1989. En rojo y azul, fenómenos considerados más importantes. Fuente: Trenberth, 2021.

A continuación se exponen las anomalías térmicas anuales registradas durante la última década en la zona de estudio (Figura 20), en donde se puede observar una tendencia de calentamiento, especialmente en el último lustro.

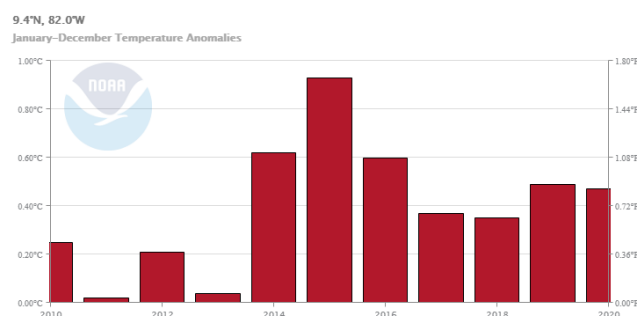
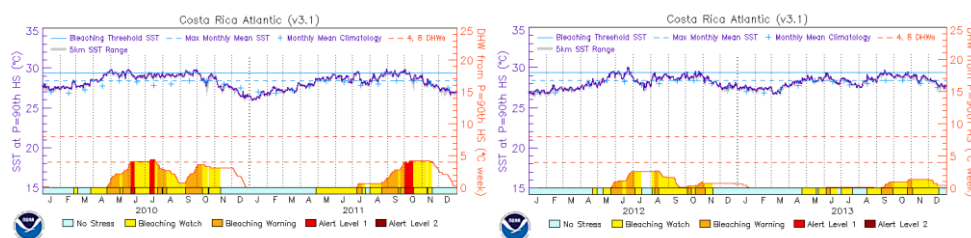


Figura 20. Anomalías térmicas anuales para la zona de estudio durante la década 2010-2020 (9.4°N - 82.0°W). Fuente: (NOAA, 2021).

Una vez apreciadas las anomalías térmicas de la última década, se mostrarán las alertas de blanqueamiento emitidas por el programa *Coral Reef Watch* para el área de estudio durante este mismo periodo, en forma de gráficas bianuales (Figura 21). Los diferentes colores asociados a cada nivel de alerta se explican en el apartado “Materiales y Métodos”.



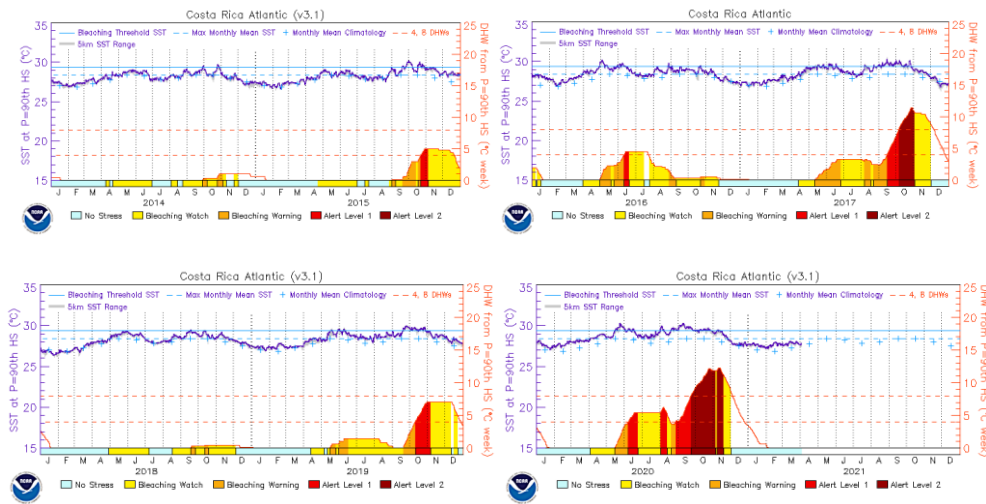


Figura 21. Alertas de blanqueamiento periodo 2010-2020. Fuente: NOAA Coral Reef Watch, 2019.

Respecto al momento en el que se realizó el estudio, la Figura 21 muestra como durante todo el mes de octubre de 2020, se presentó el nivel de alerta 2, el cual se mantuvo hasta mediados de noviembre. A lo largo de este periodo se llegaron a alcanzar DHW = 12, lo que según la NOAA equivale a un alto y prolongado estrés térmico además de una probable mortandad. Además, se puede observar que desde agosto hasta finales de noviembre, la temperatura media de la superficie del mar superó el límite térmico tolerable por los corales, establecido por el programa en 29°C. Esto también sucedió durante mayo y junio, como se ve reflejado en la gráfica mediante los niveles de alerta naranja y rojo respectivamente.

Respecto al resto de la década, el único otro momento registrado en el que se emitió el nivel de alerta 2 fue durante el mes de octubre de 2017. Por otro lado, niveles de alerta 1 (probable blanqueamiento significativo) se decretaron durante esta década en 2011 (octubre), 2015 (octubre), 2016 (junio), 2017 (septiembre) y 2019 (octubre). De esta manera, se puede observar que el periodo septiembre-noviembre coincide en la mayoría de los años con las alertas de blanqueamiento de mayor rango. Otro aspecto a destacar es el comportamiento particular de las temperaturas en el bimestre mayo-junio, en el cual se aprecia como estas temperaturas se acercan a los 29°C, y en algunos casos superan esta cota, asociándose estos periodos a niveles de alerta amarilla y naranja. Por último, se puede ver como el periodo diciembre-marzo coincide con las temperaturas del mar más bajas, y, consecuentemente, con la ausencia de estrés térmico.

5.3. Participación ciudadana

La participación ciudadana se evaluó a través de una encuesta a los miembros del Centro Comunitario que participaron en la realización de los muestreos. A continuación, se exponen las respuestas que dieron a las cuestiones relacionadas con el conocimiento de los arrecifes, su estado de salud y la utilidad de las metodologías empleadas. En la Figura 22 se ofrecen las sensaciones de los miembros del equipo sobre el estado de salud de los arrecifes de la zona de estudio, antes y después de realizar los muestreos.

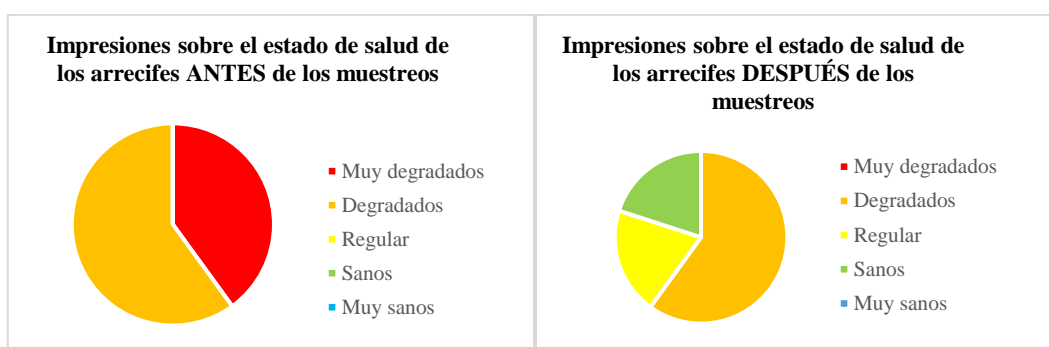


Figura 22. Impresiones de los miembros del Centro Comunitario sobre el estado de salud de los arrecifes coralinos de la zona, antes (1ª imagen) y después (2ª imagen) de realizar los muestreos.

Se aprecia como en términos generales hay una leve mejora en la percepción de la salud de estos ecosistemas, después de haberlos monitoreado y observado durante un periodo de tiempo prolongado y continuo.

En la Figura 23 se muestran las respuestas a la pregunta: ¿Cómo considerarías tu conocimiento sobre la ecología y biodiversidad de los arrecifes de coral antes y después de realizar el entrenamiento?

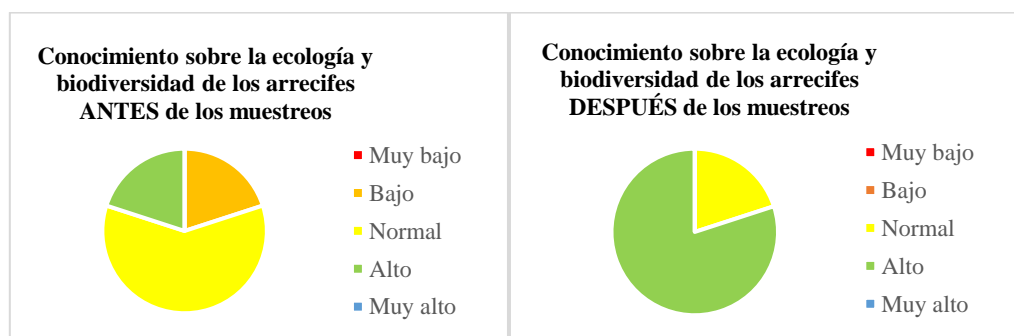


Figura 23. Impresiones de los miembros del Centro Comunitario, al respecto de su conocimiento sobre la ecología y biodiversidad de los arrecifes, antes (1ª imagen) y después (2ª imagen) de realizar los muestreos.

Se puede ver como existe un proceso de aprendizaje por parte de los miembros del equipo, después de haber sido partícipes del monitoreo.

En la Figura 24 se exponen los conocimientos de los miembros del equipo respecto al conocimiento de las metodologías y técnicas necesarias para la realización de monitoreos de arrecifes coralinos. Se observa como existe de manera general una mejora en la adquisición de conocimientos relativos al monitoreo.

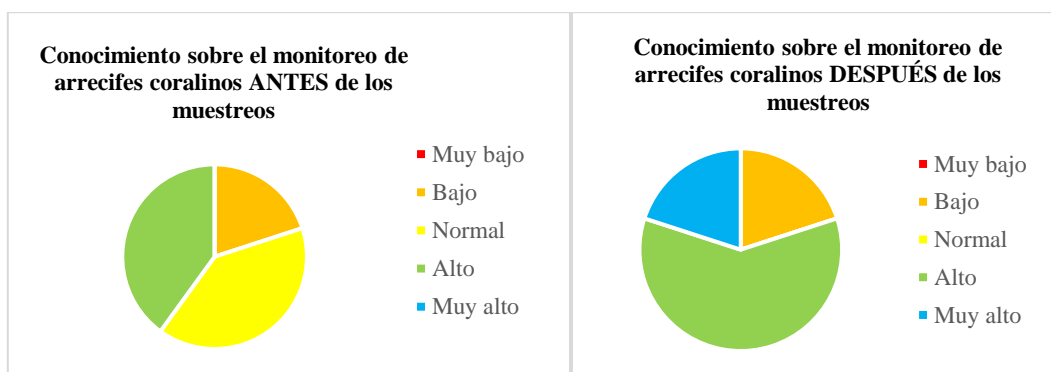


Figura 24. Impresiones de los miembros del Centro Comunitario, relativas a su conocimiento de las técnicas y procedimientos para el monitoreo de arrecifes coralinos, antes (1ª imagen) y después (2ª imagen) de realizar los muestreos.

En la figura 25 se presenta el nivel de satisfacción que generaron las metodologías empleadas en la realización de los muestreos, tanto PRONAMEC (cobertura de sustrato y rugosidad) como CHC (medida de blanqueamiento). Se aprecia como la metodología PRONAMEC suscita levemente un mayor grado de satisfacción que la metodología CHC.

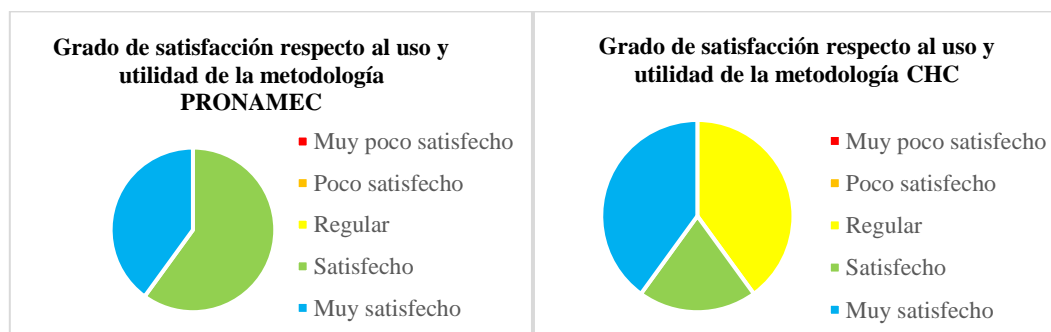


Figura 25. Grado de satisfacción de los miembros del Centro Comunitario, relativas al uso y utilidad de las metodologías PRONAMEC (1ª imagen) y CHC (2ª imagen).

Por último, en la Figura 26, se muestra el nivel de satisfacción por parte de los miembros del centro, al respecto de las charlas informativas que recibieron con anterioridad a la realización de los muestreos. En la segunda imagen de la figura se presenta también la percepción de los miembros del Centro sobre la mejora de sus habilidades de campo, a raíz de haber participado en los muestreos.



Figura 26. Grado de satisfacción de los miembros del Centro Comunitario, relativas a las charlas informativas recibidas (1ª imagen), y nivel de mejora de sus aptitudes y habilidades (2ª imagen).

A partir de la Figura 26 se puede afirmar que los miembros del equipo quedaron considerablemente satisfechos con la información preparatoria recibida. Asimismo, se aprecia claramente como sus habilidades de campo mejoraron de manera notable después de participar en el proceso de monitoreo.

6. DISCUSIÓN

En este apartado se comentarán y evaluarán los resultados obtenidos de las diferentes metodologías probadas (PRONAMEC y CRW) y se profundizará de manera más exhaustiva sobre el estrés térmico y el blanqueamiento coralino en la región. Asimismo, se tratará de comparar estos resultados con los datos mostrados por otras investigaciones y artículos relacionados con el tema y la zona de estudio.

En primer lugar, en la Figura 27, se exponen los resultados de las principales categorías evaluadas durante los muestreos de cobertura de sustrato, realizados mediante la metodología PRONAMEC.

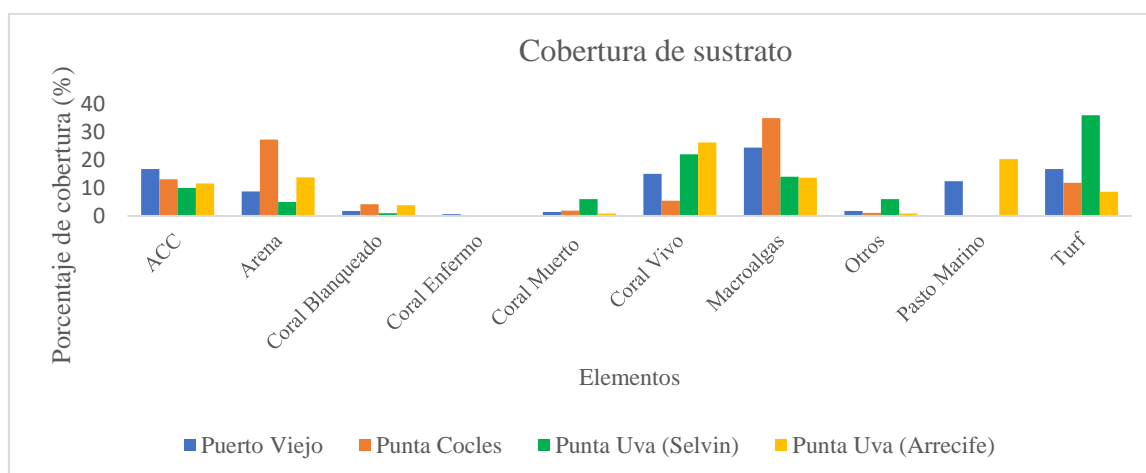


Figura 27. Comparación porcentual de cobertura del sustrato en los 4 puntos de muestreo en el Caribe Sur de Costa Rica para octubre 2020. Azul: Puerto Viejo; naranja: Punta Cocles; verde: Punta Uva (Selvin); amarillo: Punta Uva (Arrecife).

Se puede observar como los arrecifes de Puerto Viejo, y especialmente Punta Cocles, están dominados por macroalgas. En estos lugares, destacó la presencia del género de alga verde calcárea denominada *Halimeda* y las algas pardas *Sargassum* y *Dictyota*. Sin embargo, en ambos arrecifes de Punta Uva el porcentaje de coral vivo es superior a las macroalgas. La relación entre la abundancia de coral vivo y macroalgas es importante, ya que la pérdida de resiliencia de este tipo de ecosistemas está generalmente asociada al descenso de la cobertura de coral y la reducción de especies ramificadas, junto al incremento de macroalgas carnosas (Done, 1992), la eutrofización (Arias *et al.*, 2017) y la pérdida de herbívoros (Mumby, 2009).

En el arrecife de Selvin destaca la gran abundancia de tapetes algales (turf). Este elemento, de mayor dificultad de identificación visual en el campo que las macroalgas, consiste en asociaciones heterogéneas de muchas especies de pequeñas algas (Harris, 2015). Posee un rol esencial en el funcionamiento ecológico de los arrecifes de coral como fuente de alimento primario para herbívoros, fuente principal de producción y uno de los mayores competidores por el espacio que tienen los corales hermatípicos (Harris, 2015).. Sin embargo, se ha demostrado que el turf también puede tener efectos negativos sobre los corales, ya que en presencia de altos niveles de nutrientes puede experimentar un crecimiento excesivo, lo cual les convertiría en un competidor por el espacio para los corales adyacentes (Vermeij *et al.*, 2010).

Por otro lado, se puede observar como las algas coralinas costrosas se encuentran en proporciones bastante constantes, siendo un elemento importante a considerar. Este grupo de algas aportan una cantidad significativa de carbonato de calcio al arrecife y pueden facilitar el reclutamiento coralino (Dean *et al.*, 2015). Por último, resalta la presencia de pasto marino (principalmente la especie *Thalassia testudinum*) únicamente en los arrecifes de Puerto Viejo y Punta Uva (Arrecife), y la considerable abundancia de elemento abiótico (arena) en Punta Cocles. Esta último concuerda con la descripción del arrecife realizada en el apartado “Área de Estudio”, en donde se mencionaba la presencia de canales perpendicular a la línea de costa. La organización *Healthy Reefs for Healthy People*, que trabajan en el Arrecife Mesoamericano (Anexo 8), distinguen cinco niveles de salud arrecifal (Muy Bien, Bien, Regular, Mal, Crítico), cada cual con sus respectivos rangos de valores numéricos asociados a cada indicador ecológico (McField *et al.*, 2020; Tabla 3).

Tabla 3. Valores numéricos porcentuales de los indicadores “Cobertura de coral” y “Cobertura de macroalgas carnosas” asociados a índices de salud. Fuente: McField et al., 2020.

Valores de los indicadores		
(SE ASIGNA EL RANGO MÁS ALTO QUE CORRESPONDE A ESTOS VALORES MÍNIMOS)		
Indice	Cobertura de coral	Cobertura de macroalgas carnosas
Muy bien	>40%	<1%
Bien	20-40%	1-5%
Regular	10-20%	5-12%
Mal	5-10%	12-25%
Crítico	<5%	>25%

A continuación (Tabla 4) podemos observar la comparación entre los arrecifes de la zona de estudio con aquellos ubicados en los distintos países del Arrecife Mesoamericano, en términos de cobertura promedio de Coral vivo y Macroalgas carnosas.

Tabla 4. Comparación porcentual de cobertura de coral vivo y macroalgas carnosas entre los lugares de muestreo y los países del Arrecife Mesoamericano.

<i>Nombre del lugar de muestreo/país</i>	Corales vivos (% cobertura)	Macroalgas carnosas (% cobertura)
<i>Puerto Viejo</i>	15,1	24,4
<i>Punta Cocles</i>	5,5	35,0
<i>Punta Uva (Selvin)</i>	22,0	14,0
<i>Punta Uva (Arrecife)</i>	26,3	13,7
<i>Caribe Sur Costa Rica (general)</i>	17,2	21,8
<i>México</i>	16,0	18,0
<i>Belice</i>	17,0	19,0
<i>Guatemala</i>	22,0	19,0
<i>Honduras</i>	27,0	24,0
<i>Arrecife Mesoamericano</i>	19,0	20,0

Como se puede apreciar, los arrecifes de Punta Uva poseen el índice “Bien” para valores de cobertura de coral vivo, mientras que en Puerto Viejo se da el índice “Regular” y en Punta Cocles “Mal”, e incluso cercano al “Crítico”. En comparación con estos, el resto de países del Arrecife Mesoamericano presentan abundancias similares, gozando Guatemala y Honduras de porcentajes similares a Punta Uva, mientras que México y Belice se asemejan más a los de Puerto Viejo. Respecto a la cobertura de macroalgas carnosas, tanto los países del Arrecife Mesoamericano como los lugares de estudio se encuentran en la categoría “Mal”, exceptuando Punta Cocles, que posee coberturas superiores que lo sitúan en un estado “Crítico”. En términos generales, atendiendo a estos

dos indicadores, la salud de los arrecifes del Caribe Sur de Costa Rica se asemeja sobre todo a los de México y Belice, mientras que Guatemala y Honduras presentan coberturas de coral vivo superiores. Esto confirma la teoría de que está teniendo lugar un cambio de fase en los arrecifes coralinos del Caribe, los cuales están viéndose dominados por macroalgas (Szmant, 2002). Este cambio de fase comenzó a darse de manera intensa en la década de 1980, principalmente debido al declive de las poblaciones del erizo de mar *Diadema* y al gran aumento de mortandad de peces loro. Estos peces juegan un papel crítico en los procesos de herbivoría de los arrecifes (Jackson *et al.*, 2014). Una de las intervenciones de manejo para reducir los niveles de macroalgas que cita el informe del Arrecife Mesoamericano mencionado anteriormente, consistiría en reducir la contaminación por nutrientes mediante las siguientes medidas: mejorar el tratamiento de aguas residuales, reducir los lixiviados y escurrientías y restaurar la filtración natural.

Resumiendo, en términos de coral vivo, los dos arrecifes de Punta Uva presentaron los mejores resultados (22,0-26,3% de cobertura). Esto puede deberse a que son los únicos que pertenecen a un área protegida como es el REGAMA. El área marina de Punta Cocles también forma parte, pero no así la superficie terrestre adyacente (Anexo 2), por lo que está más expuesta a la actividad humana que tenga lugar. Aún así, no existen estudios que contemplen el estrés al que están expuestos estos arrecifes durante las temporadas turísticas más altas. En Puerto Viejo se contabilizó un 15,1% de coral vivo, lo cual supone una noticia muy positiva ya que se creían prácticamente muertos por la sedimentación, extracción para comercio, aguas residuales y residuos sólidos (Cortés *et al.*, 2009). Además, este dato supone un aumento respecto al 11,6% registrado en 1988 (Cortés & Jiménez, 2003). Este aumento de coral vivo coincide con el descenso en prácticamente las mismas proporciones de macroalgas respecto a tal fecha, pasando de un 37,8% (Cortés & Jiménez, 2003) a un 24,4% en la actualidad. Por otro lado, en el arrecife de Punta Cocles (Caracola) se dieron los datos más bajos de coral vivo con un 5,5%. Esto significaría un deterioro en las poblaciones de coral durante los últimos 15 años, puesto que en 2002 se reportó un 16% de coral vivo en este lugar (Fernández & Alvarado, 2004). Un factor a tener en cuenta es que aquel estudio se realizó a través de un muestreo de cuadrantes mientras que en este se utilizó el Punto Intercepto. Esta técnica tiene algunas limitaciones ya que no proporciona información del tamaño de las colonias de coral, no es muy buena para especies raras del arrecife y se requiere un número de puntos muy diverso en función de la variabilidad espacial para obtener una alta precisión (Hill &

Wilkinson, 2004). Impactos relacionados con la sedimentación fueron identificados en los años 80 (Cortés, 1981; Cortés & Risk, 1985) pero asociados al arrecife del PN Cahuita, mientras que no se han reportado eventos parecidos en esta zona. Es importante tener en cuenta que el aporte de sedimentos y nutrientes a las zonas costeras y arrecifes en la estación húmeda es sumamente mayor al de la estación seca (Roder *et al.*, 2009), por lo que sería conveniente tener presente esta circunstancia a la hora de realizar monitoreos de calidad de agua o al llevar a cabo medidas de manejo.

Respecto a las especies de coral vivo reportadas, destaca particularmente la abundancia del coral incrustante *Pseudodiploria clivosa* (Figura 28), cuya alta cobertura puede responder a la desaparición de otras especies competidoras lo que le habría proporcionado un mayor espacio para desarrollarse. Se han realizado algunos estudios sobre la ecología de esta especie que parecen demostrar un comportamiento bastante resiliente. En Fournie *et al.* (2012) comprobaron que bajo una exposición a altas temperaturas, los niveles de eficiencia fotoquímica de esta especie disminuían. Sin embargo, esto no provocaba una gran pérdida de sus tejidos ya que estos se recuperaban rápidamente a los niveles previos de esta exposición.



Figura 28. Colonia de *Pseudodiploria clivosa* en el Caribe Sur de Costa Rica.

Por otro lado se contabilizaron también individuos de *Pseudodiploria strigosa*, *Porites astreoides*, *Porites porites* (forma *divaricata*), *Siderastrea siderea*, *Siderastrea radians*, *Favia fragum*, *Agaricia agaricites* y el hidrozoo *Millepora complanata*. La cobertura de todas ellas fue relativamente baja, pero se debe reiterar que la metodología punta intercepto presenta ciertas limitaciones mencionadas anteriormente.

En lo referente a los índices de rugosidad, se obtuvieron niveles bajos, con valores cercanos a cero, lo cual es sinónimo de arrecifes planos y poco desarrollados tridimensionalmente. La pérdida de la complejidad arrecifal tiene un impacto directo en la disponibilidad de hábitat para numerosos grupos arrecifales y en la productividad asociada (McField & Kramer, 2007). Asimismo, la complejidad influye marcadamente

en la diversidad, composición y abundancia de varios grupos arrecifales, por lo que se considera un indicador importante (Dustan *et al.*, 2013). Además, afecta el movimiento del agua, la absorción de nutrientes y la disipación de la energía de las olas, entre otros procesos arrecifales (Zawada *et al.*, 2010). Una acelerada disminución de la complejidad estructural del arrecife también puede estar asociada con una bioerosión excesiva, resultado de una elevada presencia de erizos o de esponjas incrustantes (Mumby *et al.*, 2014a).

Los resultados de la metodología *Coral Health Chart* mostraron una aparente recuperación del fenómeno de blanqueamiento observado desde septiembre a principios de noviembre. Además, estos resultados parecen concordar con la baja cobertura registrada de coral blanqueado en los transectos de Punto Intercepto, cuyo valor máximo fue del 4,2% en Punta Cocles. De todas maneras, se debe diferenciar entre el porcentaje de cobertura de sustrato y el porcentaje de coral blanqueado o vivo sobre la totalidad de estos organismos registrados. En la Figura 29 se muestra el porcentaje del estado de salud de los corales en cada uno de los puntos de muestreo.

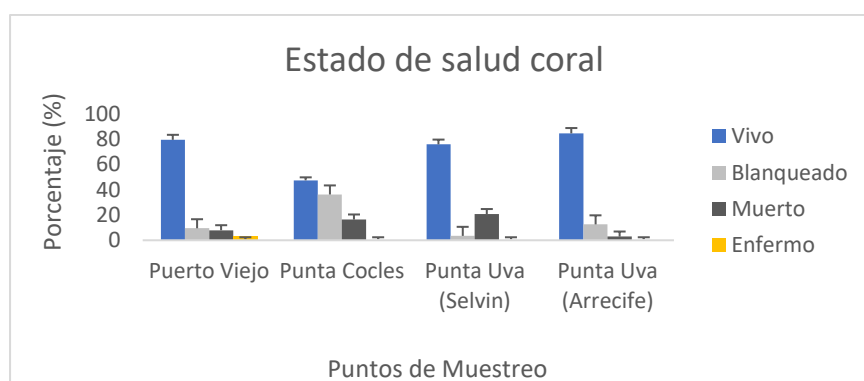


Figura 29. Comparativa del estado de salud del coral en los 4 puntos de muestreo.

Como se puede observar en la Figura 29, en 3 de los 4 puntos de muestreo (Puerto Viejo, Selvin y Arrecife) la mayoría del coral registrado (>75%) se encontró en la categoría “Vivo”. Tan solo en Punta Cocles se registró una proporción mucho más alta de coral blanqueado (36,2% sobre el total). Sería interesante analizar los motivos por los cuales se encontró una proporción de coral blanqueado superior en este lugar, que además coincide con la cobertura de coral más baja de los cuatro puntos. Aun así, tanto la metodología PRONAMEC como el CHC mostraron una reversión importante del blanqueamiento, lo que podría indicar que a pesar de que los arrecifes de esta región están sometidos a un importante estrés térmico, son resistentes y susceptibles a recuperarse después de un evento de tal naturaleza.

El CHC no permite diferenciar que especies responden mejor al estrés térmico ya que solo permite identificar por morfotipos. Además, se trata de una técnica limitada a la interpretación subjetiva del observador (Siebeck *et al.*, 2006). Igualmente, sería interesante utilizar esta técnica en el futuro en colonias geolocalizadas, antes y después de que se produzca un fenómeno de blanqueamiento.

Con el fin de entender el comportamiento de estos eventos durante la última década, se hizo una revisión histórica algo mayor, remontándonos a la década de 1980. Para realizar esta tarea con precisión, se debe considerar que el Caribe ha sido históricamente una de las áreas más expuestas al estrés térmico, pero además caracterizada por una gran variación espacial respecto a sus patrones térmicos (Heron *et al.*, 2017).

Por otro lado, resulta imprescindible hablar de uno de los mayores responsables del blanqueamiento causado por estrés térmico, conocido como ENOS (Coles & Brown, 2003). ENOS es un fenómeno complejo y uno de los impulsores más enérgicos de los patrones climáticos a nivel mundial (Timmermann *et al.*, 2018). Asimismo, se debe tener en cuenta que el estrés térmico no está asociado únicamente a una fase cálida, sino que las anomalías térmicas pueden ser también negativas. Esta fase del fenómeno, conocido como La Niña, provoca también blanqueamiento coralino en algunas regiones (Muñiz *et al.*, 2019).

El primer fenómeno masivo de blanqueamiento en el Caribe fue registrado en 1983 (Glynn, 1990). Precisamente, desde finales de 1982 a principios de 1983 tuvo lugar uno de los eventos de El Niño más fuertes registrado (Figura 19), con valores de ONI superiores a 2 durante 4 temporadas consecutivas (National Weather Service, 2021). En junio de 1983, a lo largo de la costa caribeña de Costa Rica, las temperaturas del agua se mantuvieron entre 29 y 35 °C causando blanqueamiento y la muerte de organismos arrecifales (Cortés *et al.*, 1984). Una de las especies más afectadas fue *Acropora palmata*, que, combinado con una plaga de la enfermedad de banda blanca en todo el Caribe, provocó la desaparición de casi todas las colonias de la región (Bruckner, 2003). En términos generales, a lo largo de 1983 en la región de estudio, todos los meses presentaron anomalías térmicas positivas, alcanzando su cota máxima en junio, con una anomalía media positiva de +1.21 °C (Figura 30; NOAA, 2021).

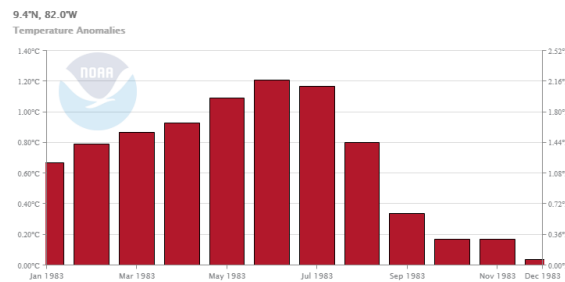


Figura 30. Anomalías térmicas mensuales para la zona de estudio (9.4 N – 82.0 W) durante el año 1983. Fuente: (NOAA, 2021).

El siguiente evento importante de blanqueamiento coralino en el Caribe fue reportado en 1988 (Goreau *et al.*, 1993; Simpson *et al.*, 2009), meses después de que tuviera lugar un fenómeno de El Niño considerable (valores de ONI superiores a 1 durante casi todo 1987; National Weather Service, 2021). En 1987 la anomalía térmica en la zona de estudio fue de +0.45°C (Figura 18) y, sin embargo, no se alertó de ningún blanqueamiento. Durante la década de 1990, se detectaron 3 años con eventos de blanqueamientos en la costa caribeña de Costa Rica: 1992, 1995 y 1998 (Cortés *et al.*, 2009). Precisamente, durante esos tres años se identificaron fenómenos de El Niño (Figura 19), siendo especialmente fuerte el de 1997-1998. En Costa Rica, tuvo una afectación mayor el evento de 1995, alcanzándose temperaturas de hasta 31°C, lo cual provocó el blanqueamiento del 62% y 67.6% de los organismos de Cahuita y el REGAMA respectivamente, además de una mortandad del 7.4% y 8.2% en estos lugares (Jiménez, 2001).

En el siglo XXI se distinguen 3 periodos en los que el Caribe ha estado expuesto a estrés térmico: 2005, 2010-2011 y 2014-2017; estos periodos han coincidido además con los episodios de blanqueamiento más extremos reportados, tanto a nivel mundial como en el mismo Caribe (Hughes *et al.*, 2018). De todos estos eventos, tan solo en 2015 tuvo lugar un fenómeno importante de ENOS, coincidiendo este con el record de anomalías térmicas positivas registradas hasta la actualidad (Figura 18). Por otro lado, el año 2005 se convirtió en receptor de uno de los fenómenos más fuertes monitoreados en el Caribe. Durante este año, el 42% de toda la superficie caribeña sufrió los efectos del estrés térmico (Muñiz *et al.*, 2019), siendo los efectos especialmente mayores y más duraderos (valores de DHW > 12) en las Antillas Menores (Eakin *et al.*, 2010). Asimismo, este fue un año record en términos de tormentas y huracanes, lo cual probablemente exacerbará la aparición de enfermedades. Como se ha mencionado previamente, el siguiente evento de blanqueamiento significativo ocurrió durante el periodo 2010-2011.

En la revisión de alertas emitidas por la NOAA en la zona de estudio durante la última década (Figura 21), se observa como durante estos dos años se decretaron alertas de blanqueamiento nivel 1 durante junio y julio de 2010 y en octubre de 2011, alcanzándose DHW = 4 en ambos periodos. En relación al fenómeno ENOS durante esta temporada, la segunda mitad de 2010, todo 2011, y principios de 2012, albergaron un fenómeno de La Niña considerable (valores de ONI alcanzados alrededor de -1.5; National Weather Service, 2021). Si bien es cierto que las alertas de blanqueamiento de mediados de 2010 pudieron estar asociadas al fenómeno de El Niño de la segunda mitad de 2009 (aunque este fue de baja intensidad). Precisamente, la anomalía térmica en la zona de estudio durante ese año fue de tan solo 0.02°C (NOAA, 2021), la más baja desde 2001, por lo que también podría haber otros factores involucrados. Estos factores, como la profundidad, fenómenos de afloramiento, corrientes y circulación de agua pueden afectar los patrones de estrés térmico a escala local (Muñiz *et al.*, 2019). Klein *et al.* (1999) estimaron un desfase de 3-6 meses para la región del Atlántico Norte Tropical (además del debilitamiento del régimen de vientos), mientras que en Muñiz *et al.* (2019) defiende que la mayor relación se da para periodos de 6-12 meses de desfase.

El periodo 2012-2014 fue bastante tranquilo respecto al blanqueamiento coralino, mostrando una completa ausencia de Niveles de Alerta 1 y 2 (Figura 21), y sin que se reportara ningún incidente de dicha naturaleza. A pesar de ello, 2014 supuso el primer año del periodo 2014-2020 en el que la anomalía térmica media se mantuvo por encima de +0.35°C (Figura 21), registrándose este año una anomalía de +0.61°C. Se debe tener en cuenta que todos estos datos de las anomalías térmicas medias se realizan en función del periodo de referencia 1981-2010.

Por último, en el periodo 2015-2017 se dio uno de los peores fenómenos de blanqueamiento masivo a nivel mundial registrados hasta la fecha (Hughes *et al.*, 2018). Como se puede apreciar en la Figura 20 por las elevadas anomalías térmicas, nuestra región de estudio no fue una excepción. El pico de estrés térmico alcanzó su cota máxima en octubre de 2017. Cabe decir que este fenómeno de blanqueamiento global estuvo muy relacionado con el fuerte evento de El Niño registrado en 2015 (Muñiz *et al.*, 2019), en el que se llegaron a medir niveles de ONI de 2.6 durante dos temporadas seguidas (octubre-noviembre-diciembre y noviembre-diciembre-enero; National Weather Service, 2021). En la zona de estudio, el año 2015 supuso el récord de anomalía térmica anual registrado hasta la fecha (+0.93°C; Figura 20). Se debe entender que a pesar de que

algunos meses poseen anomalías térmicas positivas superiores a otros, tan solo aquellos periodos del año donde el agua ya se encuentra por si misma a altas temperaturas pueden suponer un riesgo para el blanqueamiento. En la zona de estudio, estos picos de temperatura superficial del mar se dan de manera bimensual en mayo-junio y en septiembre-octubre (SINAC, 2016).

A fecha de hoy, el fenómeno de blanqueamiento más reciente en la región se produjo en septiembre y octubre de 2020 (Figura 21), pero aún no se tienen resultados concluyentes de la magnitud de dicho suceso. El impacto del cambio climático en las áreas costeras de Costa Rica no ha sido estudiado aún. Sin embargo, se espera que tengan lugar varios cambios (Cortés, 2016). En primer lugar, se producirá una subida del nivel del mar que provará grandes niveles de erosión costera, la cual ya lleva ocurriendo varios años a lo largo de la costa caribeña (Cortés & León, 2002). Esto desencadenará una mayor generación de sedimentos y propiciará la intrusión de agua salina hacia el interior (Cortés, 2016).

Para evaluar las impresiones de los miembros del Centro sobre su participación en el monitoreo, así como el grado de aprendizaje que adquirieron de estas actividades, se les realizó una encuesta (Figuras 22 a 26) en donde las respuestas abarcan una escala cualitativa de 5 niveles. En la tabla 5 se muestra la media ponderada de las respuestas que dieron, agrupadas en 5 categorías: condición de los arrecifes, conocimiento teórico, conocimiento práctico, aceptación de las metodologías empleadas y eficacia y utilidad del proyecto. Se entiende que una puntuación más cercana a 1 representa niveles más bajos tanto de la condición de los arrecifes como de su grado de conocimiento teórico-práctico, así como del nivel de aceptación sobre la capacitación que recibieron.

Tabla 5. Media ponderada de las respuestas recibidas por los miembros del Centro Comunitario a la encuesta realizada después de realizar los muestreos. Escala 1-5.

Aspecto valorado	Antes de los muestreos	Después de los muestreos
Condición de los arrecifes	1,6	2,6
Conocimiento teórico (ecología y biodiversidad)	2,4	3,8
Conocimiento práctico (metodologías de monitoreo)	3,2	3,8
	<i>PRONAMEC</i>	<i>Coral Health Chart</i>
Aceptación de las metodologías empleadas	4,4	4,0
	Calidad charlas informativas	Nivel de mejora de aptitudes y habilidades
Eficacia y utilidad del proyecto	4,4	4,4

Se puede observar como la percepción del estado de salud de los arrecifes coralinos de la zona mejoró en un punto a raíz de realizar los muestreos. Esto resulta interesante, ya que a pesar de ser personas que habitan y bucean diariamente en esta zona, tal vez se vean inconscientemente condicionados por la narrativa del deterioro general de los arrecifes. En segundo lugar, se aprecia como los participantes de los muestreos aumentaron su conocimiento tanto teórico (sobre la ecología y biodiversidad de los arrecifes) como práctico (sobre los tipos y usos de las metodologías de monitoreo y sus indicadores). Especialmente significativo es el aumento del conocimiento teórico (de 2,4 a 3,8), lo que podría indicar un buen desarrollo de los conceptos explicados en los talleres y charlas sobre estas cuestiones, además de un creciente interés y motivación autodidacta por parte del equipo. El grado de satisfacción con las metodologías empleadas es considerablemente alto, tanto para PRONAMEC (4,4) como para el CHC (4,0). Esto se puede interpretar de forma que los participantes supieron entender y desentrañar la información y técnicas utilizadas con estas metodologías. Por último, se observa como la puntuación relativa a la calidad de las charlas informativas y al grado de mejora general de aptitudes y habilidades de monitoreo es muy elevado (4,4), por lo que se puede afirmar que el proyecto tuvo un gran éxito para ambas partes.

7. RECOMENDACIONES

A partir de la búsqueda bibliográfica realizada, los resultados obtenidos en este trabajo y las conclusiones a las que se llegaron, se han establecido una serie de recomendaciones que abarcan desde la parte de trabajo de campo a acciones relacionadas con el ámbito de la gestión ambiental, enmarcadas mayormente en un contexto socioeconómico y político. Se espera que contribuyan a la preservación de los arrecifes de coral del Caribe Sur de Costa Rica, integrando el conocimiento y experiencia de los diferentes actores involucrados.

A raíz de las conclusiones obtenidas, y en función de la literatura estudiada sobre el tema (Burke & Maidens, 2004; ICT, 2005; TNC, 2008; Jackson *et al.*, 2014; McLeod, *et al.*, 2021), en las Tablas 6, 7, 8 y 9 se exponen una serie de recomendaciones generales fundamentadas en un conjunto de metas y acciones a seguir, cuyo objetivo es mejorar la conservación y manejo de los arrecifes coralinos del Caribe Sur, englobando todos los servicios y bienes que ofrecen.

Tabla 6. Conjunto de metas y acciones recomendadas, con el objetivo de crear voluntad de cambio (Acción estratégica 1).

Acción estratégica	Metas	Acciones	Actores involucrados	Grado de prioridad
1. Crear voluntad de cambio	1.1. Elevar la conciencia sobre la importancia, valor y fragilidad de los arrecifes coralinos.	Crear campañas de educación dirigidas en colegios, asociaciones y cooperativas.	ACLAC ONGs	Alta
		Realizar encuestas que recojan información sobre el conocimiento de las comunidades y turistas acerca de los beneficios que aportan los arrecifes a nivel socioeconómico y ambiental.	Consejos Regionales Consejos Locales	
	1.2. Considerar y divulgar el valor económico de los bienes y servicios coralinos.	Realizar una valoración económica de los arrecifes coralinos del Caribe Sur de Costa Rica.	CIMAR ACLAC	Moderada
		Incluir beneficios socioeconómicos dentro de los informes y reportes que vayan a ser divulgados a los diferentes agentes y retribuyentes.		
		Incluir los recursos ambientales como un importante activo en la planificación económica y en los análisis de costo-beneficio para el desarrollo costero.		
	1.3. Crear una estructura jerarquizada en la toma de decisiones dentro de los gobiernos locales.	Investigar las relaciones entre los índices netos de ahorro y la condición de los recursos marinos, así como la efectividad de su gestión.	ACLAC Universidades ONGs Consejos Regionales y Locales INCOPECA	Alta
		Definir las responsabilidades de cada uno de los actores involucrados en los gobiernos locales, y realizar evaluaciones anuales sobre el aporte y contribución de estos.		

Tabla 7. Conjunto de metas y acciones recomendadas, con el objetivo de crear capacidad para el cambio (Acción estratégica 2).

Acción estratégica	Metas	Acciones	Actores involucrados	Grado de prioridad
2. Crear capacidad para el cambio	2.1. Desarrollar el conocimiento local y nacional de los tomadores de decisiones para administrar los recursos arrecifales.	Integrar el monitoreo de factores socioeconómicos y ambientales para mejorar el conocimiento sobre los hábitats costeros, como la medida de calidad del agua, pobreza, desarrollo humano, eficiencia de las AMP,	ACLAC CIMAR ONGs	Alta
		Crear cursos de capacitación en el monitoreo y restauración coralina, tanto a nivel institucional como local.		
	2.2. Fomentar el libre flujo e intercambio de información sobre	Facilitar la participación de todos los actores del problema en la toma de decisiones sobre manejo y protección de los recursos arrecifales.	Todos los actores	Moderada

	manejo y protección de los recursos arrecifales.	Crear bases de datos públicas con artículos, investigaciones, seminarios y demás tipo de información relativa al estado de los arrecifes coralinos en Costa Rica.		
	2.3. Crear los sistemas de administración necesarios para el manejo efectivo de los arrecifes coralinos.	Regular y reestructurar los cuerpos administrativos públicos encargados de gestionar los hábitats costeros (creación de comités locales de gestión coralina comunitaria). Incluir a especialistas en el manejo de arrecifes tropicales dentro de la toma de decisiones.	ACLAC	Baja
	2.4. Utilizar evaluaciones de resiliencia como altavoz para exponer los impactos sobre los arrecifes de la región.	Crear una plataforma que se apoye en las evaluaciones de resiliencia para promocionar la conservación de los arrecifes y generar una mayor conciencia.	ACLAC CIMAR ONGs	Moderada

Tabla 8. Conjunto de metas y acciones recomendadas, con el objetivo de mejorar el manejo (Acción estratégica 3).

Acción estratégica	Metas	Acciones	Actores involucrados	Grado de prioridad
3. Mejorar el manejo	3.1. Desarrollar pesquerías sostenibles en la región.	Instaurar programas de educación dirigidos a los actores involucrados y evaluar y monitorear la intensidad de las prácticas pesqueras.	ACLAC INCOPESCA Asociaciones de pescadores locales	Baja
	3.2. Aplicar enfoques holísticos al manejo de la zona costera.	Incluir dentro de los programas de manejo todos los aspectos de cualquier índole que puedan afectar al futuro de los arrecifes coralinos, incluyendo evaluaciones periódicas de las cuencas hidrográficas. Establecer un sistema de monitoreo integrado que incluya no solo indicadores de la estructura del ecosistema, sino también elementos sociales, económicos, culturales, político, etc.	ACLAC CIMAR ONGs	Moderada
	3.3. Expandir las Áreas Marinas Protegidas y mejorar su efectividad de manejo en la salvaguardia de los ecosistemas arrecifales.	Crear un Corredor Marino del Caribe Sur de Costa Rica que abarque todos los arrecifes desde Limón hasta el Río Sixaola. Expandir y mejorar el área cubierta por el REGAMA para que incluya los arrecifes entre Punta Uva y Puerto Viejo. Reducir impactos activos y potenciales en las zonas no protegidas en las que existen vacíos legales o déficit de regulación.	ACLAC	Alta
	3.4. Desarrollar un turismo sostenible para	Realizar Estudios de Impacto Ambiental que muestren las afectaciones que	ACLAC	Alta

	asegurar beneficios a largo plazo.	puede tener un turismo sin regular en la zona, tanto a corto como largo plazo. Establecer una capacidad de carga que diferencie temporada normal de temporada alta. Monitorear la actividad turística a lo largo del año en las zonas más expuestas y vulnerables a recibir impactos antropogénicos.	Instituto Costarricense de Turismo (ICT) Cámara de Turismo y Comercio Caribe Sur (CATCAS)	
--	------------------------------------	--	--	--

Tabla 9. Conjunto de metas y acciones recomendadas, con el objetivo de promover la acción internacional (Acción estratégica 4).

Acción estratégica	Metas	Acciones	Actores involucrados	Grado de prioridad
4. Acción Internacional	4.1. Ratificar e implementar acuerdos internacionales.	Establecer un corredor marino internacional para la protección de los ecosistemas marinos tropicales, desde Bocas del Toro (Panamá) a Limón (Costa Rica). Ampliar el Corredor Biológico Talamanca-Caribe continental hacia el sector marino costero binacional.	MINAE Ministerio de Ambiente de Panamá	Moderada
	4.2. Promover la cooperación y el intercambio internacional.	Proponer la inclusión de los arrecifes caribeños costarricense dentro del Arrecife Mesoamericano.	Universidades Entidades privadas ONGs	Moderada
	4.3. Concienciación y educación ambiental sobre los efectos negativos del Cambio Climático Global (CCG) en los ecosistemas de la región.	Realizar seminarios online y establecer programas de intercambio entre los diferentes países que conforman la región del Caribe con el fin de reforzar la cooperación internacional y establecer un mayor acercamiento cultural.	Universidades ONGs	Baja

Además de estas recomendaciones generales, se pretende aportar una serie de consideraciones más asociadas a los principales impactos de origen antropogénico que sufre la región (Tabla 10) con el objetivo de esclarecer de manera más concisa qué acciones se pueden llevar a cabo para reducir o mitigar estos impactos.

Tabla 10. Acciones recomendadas para la mitigación o reducción de los principales impactos antropogénicos en la zona de estudio.

ACTIVIDADES INADECUADAS DE TURISMO ACUÁTICO	
i.	Mantener y mejorar la integridad y viabilidad del ambiente acuático del arrecife (diversidad de corales y abundancia de peces)
ii.	Desarrollar entrenamientos y proceso de certificación para todos los operadores y guías turísticos

iii.	Realizar censos a usuarios para evaluar la eficiencia e implementación de los lineamientos
iv.	Monitorear actividades acuáticas, y recopilar datos y patrones de usuarios
v.	Limitar el n° de usuarios en ciertos áreas en ciertos momentos (carga turística)
DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	
i.	Revisión, actualización y aplicación de las normativas en materia de aguas residuales
ii.	Promover tecnologías no concentradoras (humedales artificiales, fosas sépticas mejoradas, etc.) de manejo de aguas residuales
iii.	Asegurar el manejo integral de los desechos sólidos
iv.	Promover programas de reciclado e industrialización de desechos
v.	Promover la elaboración de composta asociado a proyectos de huertos de traspatio en zonas rurales y promover productos biodegradables desechables
TURISMO	
i.	Promover que el desarrollo turístico interiorice los costos de mitigación de sus propios impactos
ii.	Revisar, actualizar y aplicar la normativa en materia de ubicación, construcción y operación de infraestructura turística
iii.	Hacer una revisión de los modelos de desarrollo turístico y proponer modelos acordes que sean compatibles con el manejo de ecosistemas
SEDIMENTACIÓN Y DESCARGA DE AGROQUÍMICOS Y PESTICIDAS	
i.	Mantenimiento de la vegetación ribereña
ii.	Modelar la sedimentación a diferentes escenarios
iii.	Reducir la concentración de agroquímicos y pesticidas mediante buenas prácticas por parte de los agricultores de la cuenca alta.
SOBREPESCA Y PRÁCTICAS INADECUADAS	
i.	Transportar la pesca artesanal para que pueda llegar a ser sostenible, económicamente eficiente y organizada
ii.	Definir con los mismo pescadores las alternativas económicas para mejorar la economía del hogar en las épocas de baja captura o veda
iii.	Proteger las áreas de desove, crianza y áreas de veda

8. CONCLUSIONES

A continuación, se expondrán las principales ideas obtenidas a raíz de realizar este estudio, englobadas dentro de tres ejes: metodologías empleadas para evaluar y monitorear los arrecifes (PRONAMEC, *Coral Health Chart*), blanqueamiento coralino (anomalías térmicas, ENOS, CRW) y la participación ciudadana enmarcada en la gestión comunitaria.

La realización del trabajo de campo haciendo uso de la metodología PRONAMEC y CHC, sumado a la investigación bibliográfica nos permitió obtener varias conclusiones:

- La metodología de punto intercepto es una técnica sencilla de aplicar y económica, pero está limitada a un margen de error que se debe tener en cuenta, especialmente en términos de variabilidad espacial. Un mayor número de réplicas ayudaría a reducir este error.
- La metodología *Coral Health Chart* es una técnica interesante, que puede resultar muy útil no solo en círculos científicos, sino a nivel comunitario y local. Sin embargo, se debe trabajar de manera organizada para que exista el menor sesgo por diferencias de apreciación.
- Los arrecifes someros de Puerto Viejo, Punta Cocles y Punta Uva presentan coberturas de coral vivo variadas, encontrándose la más baja en Punta Cocles (6.3%) y la más alta en Punta Uva (22-26%)
- El tipo de coral más abundante es el masivo de tipo incrustante, siendo la especie predominante *Pseudodiploria clivosa*, mientras que las poblaciones de corales ramificados formadores de arrecifes como *Acropora palmata* y *Acropora cervicornis* prácticamente han desaparecido.
- Los arrecifes de Puerto Viejo y Punta Cocles se encuentran dominados por macroalgas, entre las que destacan las algas calcáreas del género *Halimeda*, y los géneros de algas pardas *Dictyota* y *Sargassum*.
- Los tapetes algales y las algas coralinas costrosas también son elementos importantes en estos arrecifes.
- En comparación el Arrecife Mesoamericano, el Caribe Sur de Costa Rica posee coberturas similares a México y Belice en términos de coral y macroalgas, siendo considerados sus índices de salud como “Regular” y “Malo” respectivamente.

En lo relativo al estudio y seguimiento del blanqueamiento coralino, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El porcentaje de coral blanqueado sobre el total de coral registrado en Puerto Viejo y Punta Uva fue bajo (9,47% y 3,45-12,54% respectivamente), mientras que en Punta Cocles fue claramente más importante (36,21%).
- La metodología *Coral Health Chart* supuso un instrumento de prueba para medir la recuperación de los efectos del blanqueamiento, obteniéndose resultados positivos, que, no obstante, deberían ser contrastados por fuentes más fiables.

- De acuerdo a las alertas emitidas por el programa CRW, el Caribe Sur de Costa Rica estuvo expuesto durante el mes de octubre 2020 a altos niveles de estrés térmico (Nivel de Alerta 2) que suelen asociarse con probables eventos de blanqueamiento y alta mortandad.
- Los muestreos realizados en el campo mediante las metodologías Punto Intercepto y *Coral Health Chart*, reflejaron sin embargo un nivel de blanqueamiento mucho menor respecto a la magnitud del evento de acuerdo a los niveles de alerta emitidos por CRW.
- El seguimiento histórico de las alertas de blanqueamiento coralino de la última década muestra una clara tendencia a que estos fenómenos ocurran entre los meses de septiembre y octubre, coincidiendo con las temperaturas del agua más altas del año.
- El periodo diciembre-marzo representa la época de menor riesgo para que se dé un fenómeno de blanqueamiento, albergando las temperaturas del agua más bajas del año.
- Existe una clara relación entre los eventos de El Niño y los fenómenos de blanqueamiento coralino, pero se debe estudiar más detenidamente el desfase temporal que existe entre el pico de ENOS en el Pacífico y la aparición de estrés térmico asociado en la zona de estudio.

Respecto a la asociación y colaboración con el Centro de Buceo Comunitario Embajadores y Embajadoras del Mar se extrayeron las siguientes conclusiones:

- Esta relación permitió recabar una mayor información de los aspectos cotidianos, sociales y culturales de la zona de estudio, lo que propició un mejor entendimiento del contexto general de la región.
- Se pudo apreciar el entendimiento, seguimiento y conciencia del Centro Comunitario sobre los asuntos ambientales y socioculturales que concernían al Caribe Sur de Costa Rica.
- El conocimiento de los miembros del Centro Comunitario sobre la ecología y biodiversidad de los arrecifes coralinos aumentó considerablemente gracias a su participación en los muestreos. Paralelamente, sus aptitudes para el monitoreo de los arrecifes también mejoraron, permitiéndoles de esta manera estar más preparados para la siguiente evaluación.

- La participación ciudadana enmarcada en la gestión comunitaria resulta de enorme utilidad, especialmente en lugares más aislados y con un nivel de desarrollo socioeconómico menor, donde no existen recursos y personal suficiente para llevar a cabo proyectos científicos a gran escala.
- La integración y capacitación de la población local en proyectos de conservación y gestión ambiental puede generar grandes ventajas, ya que ayuda al desarrollo socioeconómico de la zona, permite una mayor concienciación de los habitantes al ver a sus propios pobladores participar activamente en estos proyectos, y propicia una mayor divulgación de las problemáticas ambientales.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, E. (2002). Some characteristics of the annual precipitation cycle in Central America and their relationships with its surrounding tropical oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 9, 88-103. <http://hdl.handle.net/10669/15428>
- Alvarado, J., Cortés, J., & Salas, E. (2004). Status of the sea urchin *Diadema antillarum* (Echinodermata: Echinoidea) at Cahuita National Park (1977-2003), Costa Rica. *Caribbean Journal Science* 40, 257-259. <https://doi.org/10.15517/rbt.v54i3.12789>
- Alvarado, J., Herrera, L., Corrales, J., Asch, J., & Paaby, P. (2011). Identificación de las prioridades de conservación de la biodiversidad marina y costera en Costa Rica. *Biología Tropical*, 829-842. <https://doi.org/10.15517/RBT.V0I0.3143>.
- Arias, J., Fung, T., Seymour, R., Garza, R., Acosta, G., & Bozec, Y. (2017). A coral-algal phase shift in Mesoamerica not driven by changes in herbivorous fish abundance. *PLoS ONE* 12(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174855>.
- Aronson, R., & Precht, W. (1995). Landscape patterns of coral reef diversity: A test of the intermediate disturbance hypothesis. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 192, 1-14. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(95\)00052-S](https://doi.org/10.1016/0022-0981(95)00052-S).
- Barbier, E. (1989). *The Economic Value of Ecosystems: I - Tropical Wetlands*. Londres: LEET Gatekeeper Series GK.
- Barnes, D., & Lough, J. (1996). Coral skeletons: storage and recovery of environmental information. *Global Change Biology* 2 (6), 569-582. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00068.x>.
- Birkeland, C. (1997a). Life and Death of Coral Reefs. *Chapman and Hall*, 536. <https://doi.org/10.2307/2265925>.

- Birkeland, C. (2019). Chapter 2 - Global Status of Coral Reefs: In Combination, Disturbances and Stressors Become Ratchets. *World Seas: an Environmental Evaluation*, 35-56.
- Blunden, J., & Arndt, D. (2017). State of the climate in 2017. *Bulletin of the American Meteorological Society* 99, 332.
<https://doi.org/10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1>.
- Bonaldo, R., Krajewski, J., & Belwood, D. (2011). Relative impact of parrotfish grazing scars on massive Porites on Lizard Island, Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series* 423, 223-233. <https://doi.org/10.3354/meps08946>.
- Bonney, R., Cooper, C., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K., & Shirk, J. (2009). Citizen science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *BioScience* 59, 977-984.
<https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>.
- Brown, B. (1997). Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs* 16, 129-138.
<https://doi.org/10.1007/s003380050249>.
- Bruckner, A. (2003). *Proceedings of the Caribbean Acropora Workshop: Potential application of the U.S. endangered species act as a conservation strategy*. Silver Springs, Maryland, USA: NOAA Technical Mem. NMFS-OPR-24.
- Burke, L., & Maidens, J. (2004). *Reefs at Risk in the Caribbean*. Washington: World Resources Institute.
- Burke, L., Reyttar, K., Spalding, M., & Perry, A. (2011). *Reefs at Risk*. World Resources Institute.
- Byatt, A., Fothergill, A., & Holmes, M. (2001). *Blue Planet. A natural history of the oceans*. Londres: BBC Worldwide Ltd.
- Carté, B. (1996). Biomedical potential of marine natural products. *Bioscience* 46 (4), 271-286. <https://doi.org/10.2307/1312834>.
- Cesar, Burke, & Pet-Soede. (2003). *The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation*. Ceist, Netherlands: Cesar Environmental Economics Consulting (CEEC).
- Cesar, H. (1996). Economic Analysis of Indonesian Coral Reefs. *The World Bank*.
- Chica, J., & Barragán, J. (2011). *Estado y tendencia de los servicios de los ecosistemas litorales de Andalucía, Propuesta de Estrategia Andaluza de Gestión Integrada de Zonas Costeras*. 112 pp: Conserjería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- CNUMAD. (3-14 de Junio de 1992). *Departamento de Asuntos Económicos y Sociales División de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo:
<https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/riodeclaration.htm>

- Coles, S., & Brown, B. (2003). Coral bleaching - Capacity for acclimatization and adaptation. *Advances in Marine Biology* 46, 183-223.
[https://doi.org/10.1016/s0065-2881\(03\)46004-5](https://doi.org/10.1016/s0065-2881(03)46004-5).
- Connell, J. (1978). Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science* 199, 1302-1310. <https://doi.org/10.1126/science.199.4335.1302>.
- Cortés, J. (1981). The coral reef at Cahuita, Costa Rica, a reef under stress. McMaster University. Hamilton, Ontario.
- Cortés, J. (1984). El arrecife coralino del Parque Nacional Cahuita. *Revista de Biología Tropical* 32, 109-121.
- Cortés, J. (1992). Los arrecifes coralinos del Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, Limón, Costa Rica. *Revista Biología Tropical* 40, 325-333.
- Cortés, J. (1996). A reef under siltation stress: a decade of degradation. *Biological conservation*, 215-215. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(96\)83256-3](https://doi.org/10.1016/0006-3207(96)83256-3).
- Cortés, J. (2016). The Caribbean coastal and marine ecosystems. *Costa Rican Ecosystems*, 591-617.
- Cortés, J., & Guzmán, H. (1985). Arrecifes coralinos de la costa Atlántica de Costa Rica. *Brenesia* 23, 275-292.
- Cortés, J., & Jiménez, C. (2003). Past, present and future of the coral reefs of the Caribbean coast of Costa Rica. *Latin American Coral Reefs*, 223-239.
<https://doi.org/10.1016/B978-044451388-5/50011-4>.
- Cortés, J., & León, A. (2002). *The Coral Reefs of Costa Rica's Caribbean Coast*. Santo Domingo, Heredia, Costa Rica: INBio.
- Cortés, J., & Risk, M. (1985). A reef under siltation stress: Cahuita, Costa Rica. *Bulletin of Marine Science* , 339-356. University of Miami. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science.
- Cortés, J., Fonseca, A., Barrantes, M., & Denyer, P. (1998). Type, distribution and origin of sediments of the Gandoca-Manzanillo National Wildlife Refuge, Limón, Costa Rica . *Revista de Biología Tropical* 46, 251-256.
- Cortés, J., Jiménez, C., Fonseca, A., & Alvarado, J. (2009). Status and conservation of coral reef in Costa Rica. *Biología Tropical*, 33-50.
<https://10.15517/rbt.v58i1.20022>.
- Cortés, J., Murillo, J., Guzmán, H., & Acuña, J. (1984). Pérdida de zooxantelas y muerte de corales y otros organismos arrecifales en el Atlántico y Pacífico de Costa Rica. *Biología Tropical* 32, 227-231.
- Cortés, J., Soto, R., Jiménez, C., & Astorga, A. (1992). Earthquake associated mortality of intertidal and coral reef organisms (Caribbean of Costa Rica). *Proceedings of the 7th international coral reef symposium*, 235-240.

- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S., Kubiszewski, I., *et al.* (2014). Changes in the Global Value of Ecosystem Services. *Global Environment Change* 26, 152-158.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- Craik, W., Kenchington, R., & Kelleher, G. (1990). Coral-Reef Management. *Ecosystems of the World 25: Coral Reefs*, 453-467.
- CRW. (2009a). *Coral Reef Watch Satellite Monitoring*. Obtenido de NOAA Coral Reef Watch: <http://coralreefwatch.noaa.gov/>
- Cunill, N. (1991). Participación ciudadana. Venezuela. *CLAD*, 49.
- de Groot, R. (1992). *Functions of Nature: Evaluation of nature in environmental planning, management and decision making*. Groningen, The Netherlands: Wolters, Nordhoff BV. <https://doi.org/10.1017/S0032247400023779>.
- Dean, A., Steneck, R., Tager, D., & Pandolfi, J. (2015). Distribution, abundance and diversity of crustose coralline algae on the Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 34. <https://doi.org/10.1007/s00338-015-1263-5>.
- Dixon, J., Scura, L., & van't Hof, T. (1993). Meeting ecological and economic goals: marine parks in the Caribbean. *Ambio* 22 (2-3), 117-125.
- Dodge, R., & Gilbert, T. (1984). Chronology of lead pollution contained in banded coral skeletons. *Marine Biology* 82, 9-13. <https://doi.org/10.1007/BF00392758>.
- Done, T. (1992). Phase shifts in coral reef communities and their ecological significance. *Hydrobiologia* 247, 121-132. <https://doi.org/10.1007/BF00008211>.
- Dubinsky, S., & Stambler, N. (1996). Marine pollution and coral reefs. *Global Change Biology*, 511-526. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00064.x>.
- Dustan, P., Doherty, O., & Pardede, S. (2013). Digital reef rugosity estimates coral reef habitat complexity . *PLoS One* 8(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057386>.
- Eakin, C., Liu, G., Gómez, A., De La Cour, J., Heron, S., Skirving, W., *et al.* (2017). Three years of global bleaching 2014-2017. *Reef Encounter* 32, 33-38.
- Eakin, C., Morgan, J., Heron, S., Smith, T., & Liu, G. e. (2010). Caribbean Corals in Crisis: Record Thermal Stress, Bleaching and Mortality in 2005. *PLOS ONE* 5. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>.
- Erftemeijer, P., Riegl, B., Hoeksema, B., & Todd, P. (2012). Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals. *Marine Pollution Bulletin* 64, 1737-1765. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.008>.
- Fernández, C., & Alvarado, J. (2004). El arrecife coralino de Punta Cocles, costa Caribe de Costa Rica. *Biología Tropical* 52, 121-129.
- Fonseca, A., & Gamboa, C. (1999). A rapid assessment at Cahuita National Park, Costa Rica, 1999 (Part 2: Reef Fishes). *Atoll Research Bulletin* 496, 258-266. <https://doi.org/10.5479/si.00775630.496-14.258>.

- Fonseca, A., Salas, E., & Cortés, J. (2006). Monitoreo del arrecife coralino Meager Shoal, Parque Nacional Cahuita, Costa Rica (sitio CARICOMP). *Biología Tropical*, 755-563. <https://doi.org/10.15517/rbt.v54i3.12774>.
- Fonseca, E. (2003). A rapid assessment at Cahuita National Park, Costa Rica, 1999 (Part 1: stony corals and algae). *Atoll Research Bulletin*, 496. <https://doi.org/10.5479/si.00775630.13.248>.
- Fournie, J., Vivian, D., Yee, S., Courtney, L., & Barron, M. (2012). Comparative sensitivity of six scleractinian corals to temperature and solar radiation. *Diseases of aquatic organisms* 99, 85-93. <https://doi.org/10.3354/dao02459>.
- Glynn, P. (1990). Coral mortality and disturbances to coral reefs in the Tropical Eastern Pacific. *Elsevier*, 55-126. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70033-3](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70033-3).
- Goh, N., & Chou, L. (1994). Distribution and biodiversity of Singapore gorgonians (sub-class Octocorallia)- a preliminary survey. *Hydrobiologia* 285, 101-109. <https://doi.org/10.1007/BF00005658>.
- González, R. (s/f). *Consolidación de la participación ciudadana en Honduras*. s/ed.
- Goreau, T., Hayes, R., Clarke, D., Basta, & Robertson, C. (1993). Elevated sea surface temperatures correlate with Caribbean coral reef bleaching. *A global warming forum: Scientific, economic and legal overview*, 225-255.
- Gov., N. C. (6 de Abril de 2021). *In Watching for el Niño and La Niña, NOAA Adapts to Global Warming*. Obtenido de <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/watching-el-ni%C3%B1o-and-la-ni%C3%B1a-noaa-adapts-global-warming>.
- Group, M. (26 de Marzo de 2021). *Using the Coral Health Chart*. Obtenido de <https://coralwatch.org/index.php/monitoring/using-the-chart/>.
- Guzmán, H., & Cortés, J. (1984). Mortandad de *Gorgonia flabellum* en la costa del Caribe de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 32, 305-308.
- Harris, J. (2015). *The Ecology of Turf Algae on Coral Reefs*. University of California, San Diego.
- Heron, S., Maynard, J., van Hooidonk, R., & Eakin, C. (2017). Warming Trends and Bleaching Stress of the World's Coral Reefs 1985-2012. *Science Report* 6. <https://doi.org/10.1038/srep38402>.
- Herrera, W. (1985). *Clima de Costa Rica*. San José, Costa Rica: EUNED.
- Hesley, D., Burdeno, D., Drury, C., Schopmeyer, S., & Lirmanm, D. (2017). Citizen science benefits coral reef restoration activities. *Journal for Nature Conservation* 40, 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2017.09.001>.
- Hill, J., & Wilkinson, C. (2004). *Methods for Ecological Monitoring of Coral Reefs*. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Version 1, 1-116.
- Hodgson, G. (1997). Resource use: conflicts and management solutions. *Chapman and Hall*, 386-410. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5995-5_17.

- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research* 50. <https://doi.org/10.1071/MF99078>.
- Hoegh-Guldberg, O., & al., e. (2015). *Reviving the Ocean Economy: the case for action - 2015*. Geneva: WWF International.
- Hoegh-Guldberg, O., & Jones, R. (1999). Photoinhibition and photoprotection in symbiotic dinoflagellates from reef-building corals. *Marine Ecology Progress Series* 183, 73-86. <https://doi.org/10.3354/meps183073>.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P., Hooten, A., Steneck, R., Greenfield, P., Gómez, E., & Harvell, C. (2008). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science*, 1737-42. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>.
- Hughes, T. (1994). Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science* 265, 1547-1551. https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.3_part_2.093.2
- Hughes, T., & Connell, J. (1999). Multiple stressors on coral reef: A long-time perspective. *American Society of Limnology and Oceanography*, 932-940.
- Hughes, T., Anderson, K., Connolly, S., Heron, S., Kerry, J., Lough, J., *et al.* (2018). Spatial and temporal patterns of mass bleaching corals in the Anthropocene. *Science*, 80-83. <https://doi.org/10.1126/science.aan8048>.
- Hughes, T., Ayer, D., & Connell, J. (1992). The evolutionary ecology of corals . *Trends Ecol. Evo*, 292-295. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(92\)90225-Z](https://doi.org/10.1016/0169-5347(92)90225-Z).
- Hydrology, T. C. (2020). *Caribbean Coral Reef Watch: Volume 5, Issue 4*. Bridgetown, Barbados: Regional Climate Centre.
- Hydrology, T. C. (2020). *Caribbean Coral Reef Watch: Volume 5, Issue 6*. Bridgetown, Barbados: Regional Climate Centre.
- Hydrology, T. C. (2020). *Caribbean Coral Reef Watch: Volume 5, Issue 7*. Bridgetown, Barbados: Regional Climate Centre.
- IMN, I. (15 de Abril de 2021). *¿Qué es el ENOS?* Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/37774/1-Que+es+el+ENOS.pdf/df139b5d-6645-4c93-9606-085cf949e54b>.
- Iturralde-Vinent, M. (2005). La Paleogeografía del Caribe y sus implicaciones apra la biogeografía histórica. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, vol. 25-26; p 49-78.
- Jackson, J., Donovan, M., Cramer, K., & Lam, V. (2014). *Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012*. Gland, Switzerland: Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN.
- Jiménez, C. (2001). Bleaching and mortality of reef organisms during a warming event in 1995 on the Caribbean coast of Costa Rica. *Biología Tropical* 49, 233-238.

- Klein, S., Soden, B., & Lau, N. (1999). Control Remote Sea Surface Temperature Variations during ENSO: Evidence for a Tropical Atmospheric Bridge. *J. Clim* 12, 917-932.
[https://doi.org/10.1175/15200442\(1999\)012<0917:RSSTVD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(1999)012<0917:RSSTVD>2.0.CO;2).
- Knowlton, N., Brainard, R., Fisher, R., Moews, M., Plaisance, L., & Caley, M. (2010). *Coral Reef Biodiversity. In Life in the World's Ocean*, A.D. McIntyre (Ed.).
- Kovats, R., Bouma, M., Hajat, S., Worrall, E., & Haines, A. (2003). El Niño and health. *The Lancet* 362, 1481-1489. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(03\)14695-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(03)14695-8).
- Kroeker, K., Kordas, R., Crim, R., & Singh, G. (2010). Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms . *Ecology Letters* 13, 1419-1434. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01518.x>
- Lough, J., & Wilkinson, C. (2017). *Coral Reefs and Coral Bleaching*. New York: Ellen Wohl.
- Magnus, N., Folke, C., & Moberg, F. (2000). Coral reef disturbance and resilience in a human-dominated environment. *Trends in Ecology & Evolution*, 413-417.
[https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)01948-0](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)01948-0).
- McAllister, D. (1988). Environmental, economic and social costs of coral reef destruction in the Philippines. *Galaxea*, 7, 161-178.
- McClanahan, T., Rubens, J., Glaesel, H., & Kiambo, R. (1996). The Diani-Kinondo coral reefs, fisheries, and traditional management. *The Wildlife Conservation Society*, Mombasa (Kenya), 28 pp.
- McField, M., & Kramer, P. (2007). *Healthy Reefs for Healthy People: A Guide to Indicators of Reef Health and Social Well-being in the Mesoamerican Reef Region*.
- McField, M., Kramer, P., Petersen, A., Soto, M., Drysdale, I., Craig, N., & Rueda, M. (2020). *2020 Mesoamerican Reef Report Card*.
- McKinley, D., Miller-Rushing, A., Ballard, H., Bonney, R., & Brown, H. (2017). Citizen science can improve conservation science, natural resource management, and environmental protection. *Biological Conservation* 208, 15-28.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.015>.
- McKinley, D., Miller-Rushing, A., Ballard, H., Bonney, R., Brown, H., Evans, D., & Soukup, M. (2015). Investing in citizen science can improve natural resource management and environmental protection. *Biological Conservation* 19, 1-27.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.015>.
- McLeod, E., Shaver, E., Beger, M., Koss, J., & Grimsditch, G. (2021). Using resilience assessments to inform the management and conservation of coral reef ecosystems. *Journal of Environmental Management* 277. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111384>.
- MEA. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being. Synthesis*. Washington, DC: Island Press.

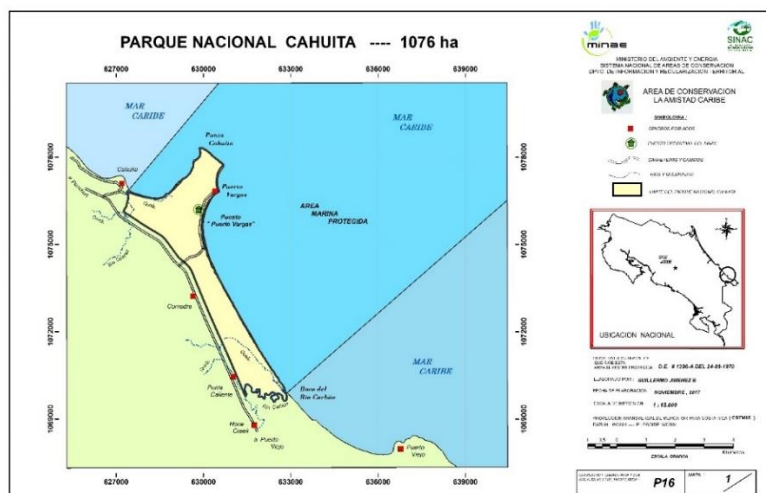
- Medaglia, J. (2016). Marco Legal e Institucional en Materia de Participación Ciudadana aplicable a la Gestión del Sistema Nacional de Áreas de Conservación de Costa Rica. *Ciencias Jurídicas* 140, 75-124.
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics* 29, 215-233. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9)
- Mooers, C., & Maul, G. (1998). Chapter 7. Intra-Americas Sea circulation. *The Sea, vol 11*, 183-208.
- Mumby, P. (2009). Phase shifts and the stability of macroalgal communities on Caribbean coral reefs. *Coral Reefs* 28, 761-773. <https://doi.org/10.1007/s00338-009-0506-8>.
- Mumby, P., & Steneck, R. (2008). Coral reef management and conservation in light of rapidly evolving ecological paradigms. *Trends in Ecology and Evolution*, 553-563. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.06.011>.
- Mumby, P., Wolff, Y., Bozec, I., Chollet, & Halloran, P. (2014a). Operationalizing the resilience of coral reefs in an era of climate change. *Conservations Letters* 7, 176-187. <https://doi.org/10.1111/conl.12047>.
- Muñiz, A., Rivera, A., & Chollet, I. *et al.* (2019). Three decades of heat stress exposure in Caribbean coral reefs: a new regional delineation to enhance conservation. *Science Report* 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47307-0>.
- Murillo, M., & Cortés, J. (1984). Alta mortalidad en la población del erizo de mar *Diadema antillarum* (Echinodermata: Echinoidea), en el Parque Nacional Cahuita, Limón, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 32, 167-169.
- National Weather Service, N. (15 de Abril de 2021). *Historical El Niño/La Niña episodes (1950-present)*. Obtenido de Cold & Warm Episodes by Season: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.
- Navas, R., Gil, D., Rodríguez, A., Reyes, M., & Garzón, J. (2010). Coral diseases and bleaching on Colombian coral reefs. *Revista de Biología Tropical* 58, 95-106. <https://doi.org/10.15517/rbt.v58i1.20026>.
- NOAA. (6 de Abril de 2021). *National Centers for Environmental Information, Climate at a Glance*. Obtenido de <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>.
- Odum, H., & Odum, E. (1955). Trophic structure and productivity of a windward coral reef community on Eniwetok Atoll. *Ecol. Monogr.* 25, 291-320. <https://doi.org/10.2307/1943285>.
- Ogden, J. (1988). The influence of adjacent systems on the structure and function of coral reefs. *Proc. 6th Int. Coral Reef Symp., 1*.
- Olmeda-Saldaña, M., Williams, S., Weil, E., & Cruz-Motta, J. (2021). Experimental evaluation of *Diadema antillarum* herbivory effects on benthic community

- assemblages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 541. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2021.151566>.
- Page, N. C. (30 de Marzo de 2021). *NOAA Coral Reef Watch 5km Methodology Page*. Obtenido de <https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/methodology.php>.
- Parrish, J. (1989). Fish communities of interacting shallow-water habitats in tropical oceanic regions. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 58, 143-160. <https://doi.org/10.3354/meps058143>.
- Paz-Pellat, F., Hernández-Ayón, J., Sosa-Ávalos, R., & Velázquez-Rodríguez, A. (2019). *Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde*. Texcoco: Programa Mexicano del Carbono.
- Reaka-Kudla, M. (1997). The global biodiversity of coral reefs: a comparison with rainforests. En M. Reaka-Kudla, D. Wilson, & E. Wilson, *Biodiversity II: Understanding and Protecting Our Natural Resources* (págs. 83-108). Washington, D.C.: Joseph Henry/National Academy Press.
- Roder, C., Cortés, J., Jiménez, C., & Lara, R. (2009). Riverine input of particulate material and inorganic nutrients to a coastal reef ecosystem at the Caribbean coast of Costa Rica. *Marine pollution bulletin* 58, 1937-1943. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.08.027>.
- Rodríguez, V., & Juan, C. (2007). Poder Comunal, planificación y participación en Venezuela. ¿Un sistema de planificación participativa? Caracas, Venezuela.
- Rogers, C., Garrison, G., Grober, R., Hillis, Z., & Franke, M. (2001). *Coral reef monitoring manual for the Caribbean and Western Atlantic*. St. John, U.S. Virgin Islands.
- Sala, E. (2015). Shifting baselines in coral reef fishes. *Cambridge University Press*, 252-257. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316105412.031>.
- Siebeck, U., Marshall, N., Kluter, A., & Hoegh-Guldberg, O. (2006). Monitoring coral bleaching using a colour reference card. *Coral Reefs* 25, 453-460. <https://doi.org/10.1007/s00338-006-0123-8>.
- Siebeck, Ulrike, D., Logan, D., & Marshall, N. (2008). *CoralWatch - a flexible coral bleaching monitoring tool for you and your group*. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium. vol 1.
- Silvertown, J. (2009). A new dawn for citizen science . *Trends in Ecology & Evolution*, 467-471. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.017>.
- Simpson, M., Scott, D., New, M., Sim, R., Smith, D., Harrison, D., et al. (2009). *An Overview of Modeling Climate Change Impacts in the Caribbean Region with contribution from the Pacific Islands*.
- SINAC . (2016). *Protocolo PRONAMEC: Protocolo para el monitoreo ecológico de formaciones coralinas. Proyecto Consolidación de las Áreas Marinas Protegidas*. San José, Costa Rica: Programa de Naciones Unidas (PNED) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF).

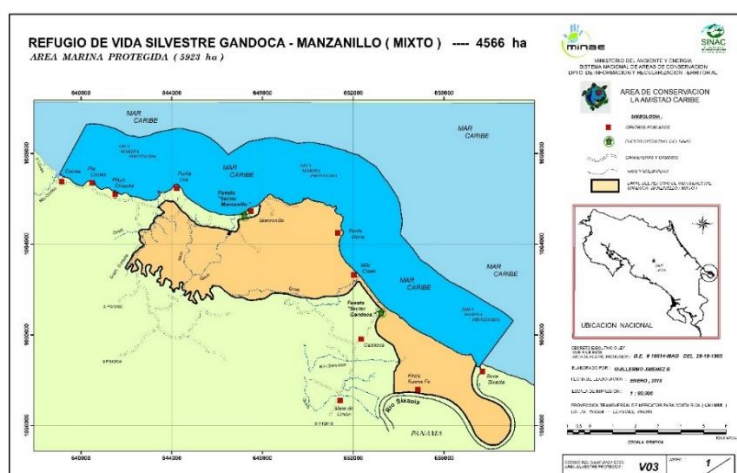
- SINAC. (2016). *Elaboración de Estudios Científicos Marino-Costeros Básicos para el Sitio de Importancia para la conservación del Caribe Sur*. San José, Costa Rica: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF).
- SINAC. (6 de Junio de 2021). Obtenido de <http://www.sinac.go.cr/ES/ac/aclac/Paginas/default.aspx>.
- SINAC. (10 de Marzo de 2021). *ÁREA DE CONSERVACIÓN LA AMISTAD CARIBE (ACLAC)*. Obtenido de <http://www.sinac.go.cr/ES/ac/aclac/Paginas/default.aspx>.
- SINAC-GIZ. (2020). *Protocolo para la restauración de arrecifes y comunidades coralinas de Costa Rica*. San José: Deutsche Gesellschaft für.
- Skirving, W., Marsh, B., De La Cour, J., Liu, G., Harris, A., Maturi, *et al.* (2020). CoralTemp and the Coral Reef Watch Coral Bleaching Heat Stress Product Suite Version 3.1. *Remote Sensing* 12, 3856. <https://doi.org/10.3390/rs12233856>.
- Sorokin, Y. (1990). Aspects of trophic relations, productivity and energy balance in reef ecosystems. *Ecosystems of the World 25: Coral Reefs*, 401-410.
- Sorokin, Y. (1993). Coral Reefs Ecology. *Ecological Studies* 102, 4-28.
- Spurgeon, J. (1992). The Economic Valuation of Coral Reefs. *Marine Pollution Bulletin*, 529-536. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(92\)90704-A](https://doi.org/10.1016/0025-326X(92)90704-A).
- Stehli, E., & Wells, I. (1971). Diversity and Age Patterns in Hermatypic Corals. *Systematic Zoology* 20, 115-126. <http://dx.doi.org/10.2307/2412052>.
- Stoddart, D. (1973). Coral Reefs of the Indian Ocean. *Biology and Geology of Coral Reefs* 1, 51-92.
- Strong, A., Liu, G., Skirving, W., & Eakin, C. (2011). NOAA's Coral Reef Watch program from satellite observations. *Annals of GIS* 17, 83-92. <https://doi.org/10.1080/19475683.2011.576266>.
- Strong, A., Rauenzahn, J., Chang, P., Ignatov, A., Liu, G., Maturi, E., Miller, L., Pichel, W., & Wang, M. (2012). Enhanced Satellite-Remote Sensing for Coral Reef Management: Next Decade.
- Szmant, A. (2002). Nutrient enrichment on coral reef: is it a major cause of coral reef decline? *Estuaries* 25, 743-766. <https://doi.org/10.1007/BF02804903>.
- Timmermann, A., An, S.I., Kug, J.S. *et al.* (2018). El Niño-Southern Oscillation complexity. *Nature* 559, 535-545. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>.
- TNC. (2008). *Evaluación de ecorregiones marinas en Mesoamérica. Sitios prioritarios para la conservación en las ecorregiones Bahía de Panamá, Isla del Coco y Nicoya del Pacífico Oriental Tropical, y en el Caribe de Costa Rica y Panamá*. San José, Costa Rica: The Nature Conservancy.
- Trenberth, K. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 2771-2778. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2).

- Trenberth, K. (21 de Enero de 2021). *The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)*. Obtenido de National Centre for Atmospheric Research: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>.
- Turismo, D. d. (2005). *Plan General de usos de la Tierra y Desarrollo Turístico para las unidades de Planeamiento Turístico del Caribe de Costarrica*. San José, Costa Rica: ICT.
- Valdez, M., & Villalobos, C. (1978). Distribución espacial, correlación con el sustrato y grado de agregación en *Diadema antillarum* (Echinodermata: Echinoidea). *Biología Tropical* 26(1), 237-245.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/25821>.
- Vermeij, M., van Moorselaar, I., Engelhard, S., Hörnlein, C., Vonk, S., & Visser, P. (2010). The effects of nutrient enrichment and herbivore abundance on the ability of turf algae to overgrow coral in the Caribbean. *PLoS ONE*.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014312>.
- Watch, N. C. (2019). *NOAA Coral Reef Watch Version 3.1 Daily 5km Satellite Regional Virtual Station Time Series Data for Costa Rica Atlantic, Enero, 2010-Diciembre, 2020*. . College Park, Maryland, USA: NOAA Coral Reef Watch. Data set .
- Watch, N. C. (7 de Abril de 2021). NOAA Coral Reef Watch Version 3.1 Daily 5km Satellite Regional Virtual Station Time Series Data for Costa Rica Atlantic Enero, 2010 - Diciembre, 2020. College Park, Maryland, USA. Obtenido de <https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/data.php>.
- Westmacott, S., Teleki, K., Wells, S., & West, J. (2000). *Manejo de arrecifes de coral blanqueados o severamente dañados*. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: UICN.
- Wiebe, W. (1988). Coral reef energetics. In: Pomeroy L.R., Alberts J.J. (eds) *Concepts of Ecosystem Ecology*, 231-245. Springer, New York, NY.
https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3842-3_11.
- Wilkinson, C., & Souter, D. (2008). *Status of Caribbean Coral Reefs after Bleaching and Hurricanes in 2005*. Townsville, Australia: Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre.
- Wood, E. (1985). Exploitation of coral reef fishes for the aquarium fish trade. *Marine Conservation Society*.
- Zawada, D., Piniak, G., & Hearn, C. (2010). Topographic complexity and roughness of a tropical benthic seaspase. *Geophysical research letters* 37(14).
<https://doi.org/10.1029/2010GL043789>.

10. ANEXOS



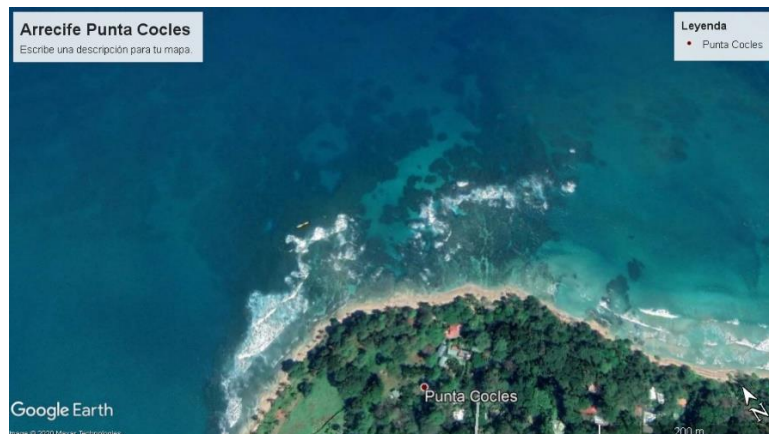
Anexo 1. Parque Nacional Cahuilla.



Anexo 2. Refugio Mixto de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo.



Anexo 3. Arrecife de Puerto Viejo. *Fuente:* Google Earth.



Anexo 4. Arrecife de Punta Cocles. *Fuente:* Google Earth.



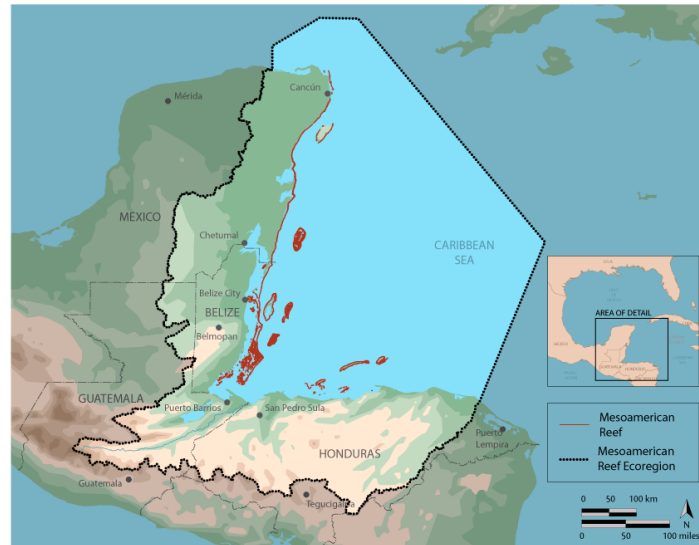
Anexo 5. Arrecife de Punta Uva (Selvin). *Fuente:* Google Earth.



Anexo 6. Arrecife de Punta Uva (Arrecife). *Fuente:* Google Earth.

Anexo 7. Encuesta realizada a los miembros del Centro de Buceo Comunitario Embajadores y Embajadoras del Mar que participaron en los muestreos.

Pregunta 1	¿Cuáles eran tus impresiones sobre el estado de los arrecifes de coral ANTES de realizar los muestreos? (1: Muy degradados – 2: Degradados – 3: Regular – 4: Sanos – 5: Muy sanos).
Pregunta 2	¿Cuáles fueron tus impresiones sobre el estado de los arrecifes de coral DESPUÉS de realizar los muestreos? (1: Muy degradados – 2: Degradados – 3: Regular – 4: Sanos – 5: Muy sanos).
Pregunta 3	¿Cómo considerarías tu conocimiento sobre la ecología y biodiversidad de los arrecifes de coral ANTES de realizar el entrenamiento? (1: Muy bajo - 2: Bajo - 3: Normal - 4: Alto - 5: Muy alto).
Pregunta 4	¿Cómo considerarías tu conocimiento sobre la ecología y biodiversidad de los arrecifes de coral DESPUÉS de realizar el entrenamiento? (1: Muy bajo - 2: Bajo - 3: Normal - 4: Alto - 5: Muy alto).
Pregunta 5	¿Cómo de satisfecho estás con la información que se proporcionó en las charlas preparativas antes de los muestreos? (1: Muy poco satisfecho, 2: Poco satisfecho, 3: Normal, 4: Satisfecho, 5: Muy satisfecho).
Pregunta 6	¿Cuánto crees que mejoraron tus habilidades de campo después de realizar los entrenamientos (PRONAMEC Y Coral Health Chart)? (1: Nada - 2: Poco - 3: Algo - 4: Bastante - 5: Mucho).
Pregunta 7	Respecto al monitoreo de arrecifes coralinos, ¿cuál era tu conocimiento sobre estos procedimientos y metodologías ANTES de realizar los entrenamientos? (1: Muy bajo - 2: Bajo - 3: Normal - 4: Alto - 5: Muy alto).
Pregunta 8	Respecto al monitoreo de arrecifes coralinos, ¿cuál fue tu conocimiento sobre estos procedimientos y metodologías DESPUÉS de realizar los entrenamientos? (1: Muy bajo - 2: Bajo - 3: Normal - 4: Alto - 5: Muy alto).
Pregunta 9	Respecto a la metodología PRONAMEC (cobertura de sustrato, conteo de peces, medida rugosidad), ¿cómo de satisfecho estás con esta metodología, respecto a su uso y utilidad? (1: Muy poco satisfecho - 2: Poco satisfecho - 3: Regular - 4: Satisfecho - 5: Muy satisfecho).
Pregunta 10	Respecto a la metodología Coral Health Chart (cuadro de color), ¿cómo de satisfecho estás con esta metodología, respecto a su uso y utilidad? (1: Muy poco satisfecho - 2: Poco satisfecho - 3: Regular - 4: Satisfecho - 5: Muy satisfecho).



Anexo 8. Ecorregión del Arrecife Mesoamericano. En rojo, los arrecifes pertenecientes a esta región.